



DIPARTIMENTO DI CHIMICA E CHIMICA INDUSTRIALE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA



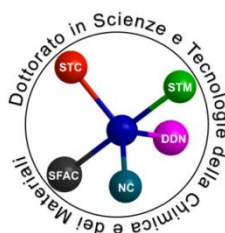
Università degli Studi di Genova

Corso di Dottorato in:

“Scienze e tecnologie della chimica e dei materiali”

Curriculum: ***Scienze e tecnologie chimiche***

Ciclo XXXII, codice 6200



***Elaborazioni di immagini digitali:
applicazioni innovative ai materiali dell'arte
come guida per interventi di conservazione e restauro.***

Dottoranda:

Emanuela MANFREDI

Supervisor:

Prof. Giovanni PETRILLO (DCCI)

Prof.ssa Silvana DELLEPIANE (DITEN)

Indice

Introduzione	Pag. 4
<i>La fotografia digitale a supporto della colorimetria nell'applicazione ai Beni Culturali: utilità e prospettive</i>	Pag. 4
<i>Il progetto: obiettivo e fasi attuative</i>	Pag. 6
Capitolo 1 - Che cos'è il colore?	Pag. 9
1.1. <i>Il sistema visivo umano</i>	Pag. 9
1.2. <i>La percezione del colore</i>	Pag. 11
Capitolo 2 - La colorimetria	Pag. 14
2.1. <i>Specificazione psicofisica del colore</i>	Pag. 15
2.2. <i>Specificazione psicometrica del colore: i sistemi CIE1976</i>	Pag. 18
2.2.1. <i>La differenza colorimetrica</i>	Pag. 20
2.3. <i>Specificazione mediante atlanti</i>	Pag. 24
Capitolo 3 - Lo studio digitale del colore	Pag. 26
3.1. <i>International Color Consortium</i>	Pag. 26
3.2. <i>Gli spazi colore nel digitale: Adobe RGB-1998 e sRGB</i>	Pag. 31
3.3. <i>Caso di studio digitale del colore: le formelle dei "Misteri del Rosario" di Chiusanico (IM)</i>	Pag. 37
Capitolo 4 - Il colorimetro	Pag. 49
Capitolo 5 - La fotocamera digitale	Pag. 52
5.1. <i>Il sensore CCD</i>	Pag. 54
5.2. <i>Il sensore CMOS</i>	Pag. 56
Capitolo 6 - La caratterizzazione del dato fotografico: il set di dati	Pag. 57
6.1. <i>Scala colore ColorChecker Passport Photo X-Rite</i>	Pag. 57
6.2. <i>Tela preparata presso il DCCI secondo i suggerimenti di Giorgio Vasari</i>	Pag. 59
6.3. <i>Tavole preparate presso i laboratori di restauro del Centro per la Conservazione ed il Restauro dei Beni Culturali "La Venaria Reale"</i>	Pag. 62
Capitolo 7 - La caratterizzazione del dato fotografico: stato dell'arte	Pag. 67
7.1. <i>Metodo X-Rite</i>	Pag. 67
7.2. <i>Metodo "polinomiale"</i>	Pag. 67
7.3. <i>Metodo della correzione gamma</i>	Pag. 68

Capitolo 8 – La caratterizzazione del dato fotografico per i beni culturali	Pag. 70
8.1. Caratterizzazione con i metodi di letteratura	Pag. 71
8.1.1. Metodo di caratterizzazione “polinomiale”	Pag. 71
8.1.2. Metodo di caratterizzazione secondo correzione gamma	Pag. 73
8.2. Metodo originale elaborato durante il dottorato	Pag. 75
Capitolo 9 - Caratterizzazione di una macchina fotografica a sensore CCD: confronto con la caratterizzazione della fotocamera a sensore CMOS	Pag. 83
Capitolo 10 - Caratterizzazione per “classi” di campioni	Pag. 89
10.1 Suddivisione in “classi” sulla base della cromia	Pag. 89
10.2. Suddivisione in “classi” sulla base dell’elemento chimico predominante	Pag. 94
10.3. Valutazione dell’efficacia della caratterizzazione per “classi” di campioni	Pag. 99
10.4. Applicazione della caratterizzazione per “classi” all’osservazione dell’andamento nel tempo della cromia di campioni depositati su tela	Pag. 100
10.5. Considerazioni riassuntive sul significato della caratterizzazione per “classi”	Pag. 103
Capitolo 11 - Caratterizzazione per “classi” sulla base dell’elemento chimico predominante (“classi” elementali): casi di studio	Pag. 105
11.1. Ex-voto: formella policroma su lamina di ferro	Pag. 105
11.2. Blu egiziano	Pag. 111
11.3. Classificazione di cromie mediante approcci statistici	Pag. 112
Conclusioni	Pag. 116
APPENDICE A	Pag. 118
APPENDICE B	Pag. 119
Glossario	Pag. 120
Acronimi e Sigle	Pag. 123

Introduzione

La fotografia digitale a supporto della colorimetria nell'applicazione ai Beni Culturali: utilità e prospettive

Nel campo dei Beni Culturali, la diagnostica rappresenta uno strumento fondamentale per la conservazione e la valorizzazione di un'opera d'arte, perché consente, grazie all'esperienza dell'operatore ed allo straordinario, continuo sviluppo della tecnologia associata alla strumentazione analitica disponibile, di valutare lo stato conservativo dell'oggetto sotto indagine e, spesso, di tracciarne la storia.

Ai fini del raggiungimento degli obiettivi sopra descritti, la diagnostica si avvale dell'apporto sinergico di più discipline in grado di dare risposta a quesiti specifici dipendenti dall'eterogeneità dell'oggetto artistico in esame. Tra i diversi possibili approcci, uno che ha fatto enormi progressi in questi ultimi anni è l'elaborazione di immagini digitali, ossia l'utilizzo di specifici algoritmi, più o meno complessi, per estrarre informazioni "oggettive" ed universalmente valide dalle immagini visualizzate, ad esempio, sullo schermo di un computer: nella fattispecie, fotografie di oggetti di interesse storico-artistico.

L'applicazione forse attualmente più frequente dell'elaborazione digitale nell'ambito dei Beni Culturali consiste nella realizzazione di restauri virtuali: se un'opera è danneggiata e richiede un intervento di ripristino, viene simulato virtualmente il restauro sulla sua immagine digitale, seguendo le indicazioni del restauratore, al fine di valutare quale sia la tecnica migliore da adoperare affinché l'opera stessa venga rispettata ed appropriatamente valorizzata. Questo approccio permette di apprezzare come una determinata azione possa incidere sul bene da restaurare prima di "metterci le mani".

In effetti, nell'ambito di un progetto di conservazione e restauro di un'opera d'arte, diverse sono le domande alle quali il diagnosta deve saper rispondere, attraverso un monitoraggio costante delle condizioni dell'opera stessa e dell'efficacia dell'intervento. Di solito le azioni di monitoraggio consistono nel valutare la stabilità e/o eventuale modificazione di alcune caratteristiche dell'oggetto sotto osservazione e, nel caso di un'opera pittorica o comunque di una superficie mono- o policromatica, il "colore" è indubbiamente una, se non la principale, di queste caratteristiche, in quanto facilmente percepita dall'occhio umano ed in grado di contraddistinguere l'opera e fornire informazioni sulla sua natura e sul suo stato. L'analisi quali- e soprattutto quantitativa del colore viene normalmente effettuata con adeguata strumentazione scientifica quale quella rappresentata dal colorimetro (Capitolo 4), in grado di fornire una misura del "colore" secondo le norme e gli standard della Commissione Internazionale dell'Illuminamento (CIE) che consenta una valutazione oggettiva del colore per monitorare nel tempo lo stato dell'opera e programmare opportunamente interventi periodici di controllo.

Tuttavia raramente un laboratorio di restauro è dotato di una strumentazione analitica

specifica come il colorimetro, i cui costi, ancora oggi, sono sostenibili solo dai laboratori più grossi ed affermati. La diagnostica deve pertanto generalmente appoggiarsi a laboratori di analisi privati o ad enti (università o soprintendenze, ad esempio) o fare essenzialmente affidamento sulla competenza e sull'esperienza del restauratore stesso. Più facilmente il monitoraggio dell'andamento di un intervento su un'opera d'arte viene effettuato dal restauratore mediante una documentazione fotografica, tramite foto scattate prima, durante e dopo l'intervento. La tecnologia utilizzata però, per quanto rappresentata da una macchina fotografica professionale e da un set fotografico con adeguata illuminazione, è generalmente minimale e relativamente economica: pertanto questa pratica, piuttosto comune tra gli addetti, soffre dell'handicap non trascurabile che le informazioni ottenibili, specie se il restauratore scatta le foto secondo proprie impostazioni e disposizioni del set fotografico, sono relative ad un contesto specifico e poco confrontabili con dati standard o acquisiti in contesti diversi. Purtroppo, anche se i restauratori scattassero le foto seguendo comunque un set costante di *calibrazione*, di disposizione di luci e di posizionamento dell'opera, i dati fotografici sul colore continuerebbero a presentare minore attendibilità e affidabilità di quella fornita da strumenti scientifici più specifici.

Bisogna però anche considerare che, in generale, un bene artistico non presenta superfici cromaticamente omogenee perché, essendo di norma un prodotto artigianale, è composto da campiture con diverse sfumature del medesimo pigmento; pertanto una misura "puntiforme", quale quella fornita dal colorimetro, richiede la ripetizione dell'analisi in diversi punti dell'area caratterizzata dalla stessa cromia, al fine di poter definire una stima che descriva mediamente il colore di quel campione: è ovvio che questa procedura richiede tempo ed energie maggiori rispetto alla misura di un'area perfettamente (ed idealmente) omogenea. Un singolo scatto fotografico, al contrario, permette di immagazzinare i dati sul colore di ogni pixel dell'area selezionata.

Riassumendo quanto sinora discusso, nel bilancio tra i fattori positivi e quelli negativi la facilità con la quale è possibile scattare fotografie e la capacità di gestire aree di misura più estese di un singolo punto con un unico scatto rendono l'eventuale utilizzo della macchina fotografica digitale come colorimetro (cioè ai fini di una "misurazione" quantitativa ed oggettiva del colore) un obiettivo di estremo interesse pratico. Come verrà più ampiamente ricordato nel successivo paragrafo, l'elaborazione dell'immagine digitale può contribuire a raggiungere tale obiettivo mediante l'uso di metodologie che hanno lo scopo di correggere i dati acquisiti sul colore nel digitale approssimandoli a quelli colorimetrici, ossia mediante quell'operazione che viene comunemente definita *caratterizzazione* della macchina fotografica.

A conclusione di questo paragrafo introduttivo, e come stimolo e motivazione del mio impegno nel presente progetto di dottorato voglio ricordare che, dopo la laurea magistrale, ho trascorso un periodo di "apprendistato" presso un laboratorio di restauro in Genova. La restauratrice, tra le altre cose, era particolarmente interessata a conoscere, al fine di utilizzare appropriati prodotti e metodologie nell'ambito di uno specifico progetto di conservazione e restauro, la natura dei pigmenti che caratterizzavano una serie di formelle policrome devozionali su latta (lega ferro e stagno o, più semplicemente nel caso in esame, ferro rivestito di uno strato di stagno), rappresentanti "I Misteri del Rosario" della Chiesa Parrocchiale di Chiusanico, comune dell'entroterra ligure in provincia di Imperia. L'obiettivo era piuttosto difficile da raggiungere in quanto le formelle si presentavano in uno stato di degrado avanzato, dovuto a corrosione,

formazione di ruggine e conseguente rigonfiamento e sollevamento della superficie con abbondante perdita di materiale pittorico. Nel caso specifico, la non disponibilità di una adeguata attrezzatura per la determinazione quali- e quantitativa del colore (colorimetro) o di un adeguato protocollo di trasformazione del dato fotografico digitale in un dato oggettivo che consentisse di seguire regolarmente l'efficacia del restauro, la restauratrice ha dovuto fare affidamento essenzialmente all'esperienza professionale per portare a compimento un'operazione di restauro rivelatasi alla fine, comunque, più che soddisfacente per la committenza.

In effetti, come primo approccio all'uso della fotocamera digitale per lo studio del colore in ambito artistico, ho potuto verificare *ex-post*, nel corso del primo anno di dottorato (Paragrafo 3.3), come la digitalizzazione delle immagini sulle formelle dei Misteri consenta di confermare, già tramite un confronto essenzialmente qualitativo tra il prima e il dopo, come la metodica utilizzata per l'intervento di restauro, basata prevalentemente su una tecnica di ripulitura laser innovativa nel campo specifico, abbia effettivamente contribuito a migliorare la visibilità cromatica senza alterare la natura stessa della cromia: risultato indubbiamente interessante e gratificante, ma senz'altro non sufficiente per uno studio completo, quantitativo, di superfici cromatiche.

Il progetto: obiettivo e fasi attuative

Il progetto di Dottorato nasce quindi, come anticipato nel paragrafo precedente, proprio dalla constatazione delle delineate difficoltà oggettive nella diagnostica dei Beni Culturali, con l'obiettivo di contribuire a consentire agli operatori del settore di utilizzare, per lo studio quantitativo del colore, la fotocamera digitale, cioè un dispositivo economicamente e operativamente competitivo rispetto ad una strumentazione scientifica di tipo colorimetrico; il raggiungimento dell'obiettivo richiede l'abbinamento, all'uso della fotocamera, di una tecnica di elaborazione matematica (*caratterizzazione*) dell'informazione digitale così acquisita, in grado di individuare la relazione esistente tra il modo di percezione del colore da parte della macchina fotografica (in condizioni di scatto e di altre regolazioni del set fotografico esattamente definite) e quello del colorimetro^{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11}.

¹ Standardization, I.O.F *Graphic Technology and Photography_Colour Characterisation of Digital Still-cameras (DSCs)*, ISO 17321-1:2012, 2012.

² Westland S., Ripamonti C., Cheung V., *Computational Colour Science using MATLAB*, John Wiley & Sons, 2012.

³ Melis M., Miccoli M., *Trasformazione evoluzionistica di una fotocamera reflex digitale in un sofisticato strumento per misure fotometriche e colorimetriche*, IX Conferenza del Colore, Firenze, 19-20 settembre 2013.

⁴ Martinez-Verdù F., Pujoul J., Capilla P., *Calculation of the Color Matching Functions of Digital Cameras from Their Complete Spectral Sensitivities*, Journal of imaging science and technology, vol.46, 2002.

⁵ Martinez-Verdù F., Pujoul J., Vilaseca M., *Characterization of a digital camera as an absolute tristimulus colorimeter*, Journal of imaging science and technology, vol.47, 2003.

⁶ Banard K., Funt B., *Camera Characterization for Color Research*, Color Research and Application, 2002.

⁷ Gaiani M., Apollonio F., Ballobeni A., Remondino F., *Seeming Color Fidelity in 3D Architectural Heritage Scenarios*, Sensor, 2017.

⁸ Leòn K., Mery D., Pedreschi F., Leòn J., *Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images*, Food Research International, 2006.

⁹ Johnson T., *Methods for characterizing colour scanners and digital camera*, Display, 1996.

¹⁰ Hunt R.W.G., Pointer M.R., *Measuring colour*, A. John Wiley & Sons, 2011.

Va precisato che, per quanto riguarda l'uso della fotografia digitale come valutazione del "colore", interesse decisamente maggiore è stato sinora rivolto al settore alimentare dove, tramite il monitoraggio della colorazione, viene stimato lo stato conservativo di determinati alimenti^{12,13} (ad esempio, il colore della buccia di un frutto consente di stabilire se si tratta di un frutto acerbo oppure troppo maturo) oppure al settore odontoiatrico, per valutare tramite fotografia il colore o, più in particolare, il grado di bianchezza dei denti. Per quanto riguarda il settore dei Beni Culturali, ad oggi pochi sono gli esempi di *caratterizzazione* di una fotocamera^{14,15}.

L'approccio generalmente utilizzato è rappresentato da un *metodo supervisionato*, che prevede la disponibilità di un insieme di campioni dove i singoli elementi sono univocamente etichettati ad una delle classi predefinite (caso della *Classificazione*) o dove le relazioni tra variabili dipendenti e indipendenti sono perfettamente note (caso della *Regressione*). Nella specifica applicazione del presente lavoro, ogni elemento del campione è descritto da una misura puntuale di colore estratta dall'immagine fotografica e da un valore (cosiddetto di *ground-truth* o realtà al suolo) che associa una etichetta relativa alla corrispondente campitura pittorica e alla relativa misura ottenuta tramite colorimetro.

Nell'ambito del presente progetto di tesi, alcuni modelli di *regressione* sono stati utilizzati per predire i dati colorimetrici effettivi (Capitolo 8) mentre alcuni *classificatori* statistici sono stati usati per classificare i pigmenti nelle classi del "ferro" o del "senza ferro" in base alle loro coordinate colorimetriche (Paragrafo 11.3).

Nei metodi supervisionati, sulla base dei campioni noti, si esegue una prima fase di addestramento che definisce il modello di classificazione o di regressione, seguita da una fase dedicata alla valutazione delle prestazioni del modello. A questo scopo, a partire dall'insieme dei campioni univocamente etichettati vengono definiti i due sottoinsiemi di *training* (*training set* o "insieme di addestramento"¹⁶) e di *test* (*test set* o "insieme di valutazione"). Una valutazione preliminare del modello può essere eseguita utilizzando lo stesso campione di training anche per la fase di test. Tuttavia, la valutazione della capacità predittiva, della robustezza e dell'affidabilità del modello deve essere successivamente valutata su un test set diverso dal training set¹⁷, seppur rappresentativo della stessa classe di misure.

Scegliendo, come base di partenza, due tra i più comuni metodi di *regressione* per la *caratterizzazione* del dato fotografico pubblicati in letteratura e relativi ad applicazioni specifiche in campi diversi da quello dei Beni Culturali, le relative procedure sono state applicate a *dataset*

¹¹ Finlayson G.D., Mackiewicz M., Hurlbert A., *Color Correction Using Root-Polynomial Regression*, IEEE transactions on image processing, VOL.25, 2015.

¹² Valous N., Sun D.W., *Colour calibration of a laboratory computer vision system for quality evaluation of pre-sliced hams*, Meat Science, 2009, 81, 132-141.

¹³ Jackman P., Sun D.W., ElMasry G., *Robust colour calibration of an imaging system using a colour space transform and advanced regression modelling*, Meat Science, 2012, 91, 402-407.

¹⁴ Akkaynak D., Treibitz T., Xiao B., Gurkon U.A., Allen J.J., Demirci U., Houlan R.T., *Use of commercial off-the-shelf digital cameras for scientific data acquisition and scene-specific color calibration*, Journal of the Optical Society of America A, Opt. Image Sci. Vis., 2014, 31, 312-321.

¹⁵ Sanmartin P., Chorro E., Varquez-Nion D., Martinez-Verdù F.M., Prieto B., *Conversion of a digital camera into a non-contact colorimeter for use in stone cultural heritage: The application case to Spanish granites*, Measurement, 2014.

¹⁶ Duda R.O., Hart P.E., Stork D.G., *Pattern Classification*, Wiley, 2001

¹⁷ Appunti di Analisi multivariata, Scuola di Chemiometria, Genova, gennaio 2019.

appositamente individuati e predisposti (Capitolo 6) per valutarne l'efficacia nello studio del colore nell'ambito dei beni artistici (Capitolo 8). Entrambi i metodi (che rappresentano l'approccio più frequente negli studi di settore) prevedono l'utilizzo di una matrice polinomiale identificata a partire dal *training set* e utilizzata per predire i risultati colorimetrici del *test set*. Le prestazioni si basano sulla valutazione quantitativa di metriche di distanza che tengono conto delle più recenti definizioni di standard in ambito colorimetrico.

Per ottimizzare i metodi noti cercando di superare alcune problematiche di accuratezza, è stato appositamente sviluppato un nuovo metodo (Paragrafo 8.3) che risulta relativamente più semplice e facilmente implementabile di quelli di letteratura, grazie alla capacità di tenere in considerazione le correlazioni esistenti tra le componenti colorimetriche delle sperimentazioni.

Tuttavia, poiché i risultati raggiunti, seppur buoni, non erano ancora rispondenti agli obiettivi prefissati, è stata eseguita una accurata analisi statistica dei dati per verificarne le principali caratteristiche ai fini dell'applicabilità del metodo di *caratterizzazione* più opportuno. Da tale indagine emerge una scarsa rispondenza all'ipotesi di omoschedasticità fatta generalmente nell'applicazione di simili procedure.

Ne deriva l'ideazione di un nuovo metodo di *caratterizzazione* che, piuttosto che lavorare a livello globale, applica un modello adattivo sulla base di alcune classi predefinite di elementi del *dataset* (Capitolo 10). L'errore, che prima risultava disuniforme, diventa adesso omogeneo e mediamente le prestazioni migliorano avvicinandosi all'obiettivo iniziale.

Dal nuovo modello sviluppato deriva infine un'ulteriore proposta per uno strumento innovativo di supporto alla diagnostica nei beni artistici. Infatti, il diverso comportamento del modello sulle varie classi chimiche permette anche di formulare ipotesi attendibili riguardo gli elementi chimici di una tinta a supporto dell'opera del restauratore. La validità di questo strumento è evidenziata in particolare da un caso di studio descritto nel Capitolo 11 e rappresentato da un'immagine votiva policroma, che ha consentito non solo di confermare i risultati di precedenti indagini strumentali sull'oggetto, ma anche di chiarire alcuni dubbi che tali indagini avevano lasciato irrisolti.

Capitolo 1

Che cos'è il colore?

“Il colore non è una grandezza fisica ma una qualità della sensazione visiva, un'entità puramente soggettiva e incomunicabile.

Ciò pare negare a priori ogni misura sul colore, ma così non è se si considera che persone diverse possono in generale essere in accordo circa le eguaglianze di colore, cioè convenire che radiazioni fisicamente diverse appaiono cromaticamente uguali. La colorimetria si fonda su questa corrispondenza univoca (molti a uno) tra radiazioni visibili e sensazioni di colore”¹⁸

Secondo l'American Society for Testing and Materials (ASTM) International:

“Aspect of object appearance distinct from form, shape, size, position, or gloss that depends upon the spectral composition of the incident light, the spectral reflectance or transmittance of the object, and the spectral response of the observer, as well as the illuminating and viewing geometry.”¹⁹

Il colore è dunque una proprietà legata sia alla natura chimico-fisica del campione in esame che all'interazione della luce riflessa dalla superficie del campione con il sistema visivo umano; comprendere il colore significa quindi da un lato studiare le caratteristiche di riflettanza degli oggetti, ossia la parte di luce riflessa dall'oggetto rispetto alla luce incidente, dall'altro lato conoscere il comportamento del sistema visivo umano.

1.1. Il sistema visivo umano

L'occhio umano è ricoperto al suo interno da una membrana detta retina, che a sua volta presenta, sparsi in maniera non omogenea, dei fotorecettori, organi sensibili alla radiazione elettromagnetica, che possono essere distinti in:

- **bastoncelli** (Figura 1.1), che permettono la visione notturna o scotopica, a bassi livelli di illuminamento;
- **coni** (Figura 1.1), che sono i responsabili della visione diurna o fotopica, ad alti livelli di illuminamento.

I coni sono alla base della percezione del colore in condizioni di media e alta luminosità; in condizioni di scarsa luminosità la visione cromatica diminuisce e diventano efficaci i bastoncelli, recettori monocromatici a "visione notturna".

¹⁸ C. Oleari, *Misurare il colore. Fisiologia della visione a colori. Fotometria-Colorimetria e norme internazionali*, Hoepli, 2016.

¹⁹ ASTM E284 - 13b, *Standard Terminology of Appearance*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

Mentre i bastoncelli non contribuiscono alla percezione del colore, i coni contengono tre distinti pigmenti che assorbono in percentuali diverse le varie radiazioni elettromagnetiche nella regione del visibile.

I coni possono essere distinti, in funzione del pigmento che contengono (Figura 1.2), in:

- *Coni L* (detti anche coni rossi), la cui curva di assorbimento copre le regioni delle lunghe/medie lunghezze d'onda, con il massimo a 560 nm circa.
- *Coni M* (detti anche coni verdi), caratterizzati da una curva di assorbimento nella regione delle medie lunghezze d'onda e con massimo intorno a 530 nm.
- *Coni S* (detti anche coni blu), la cui curva si estende nella regione delle corte lunghezze d'onda con un massimo a 420 nm approssimativamente.

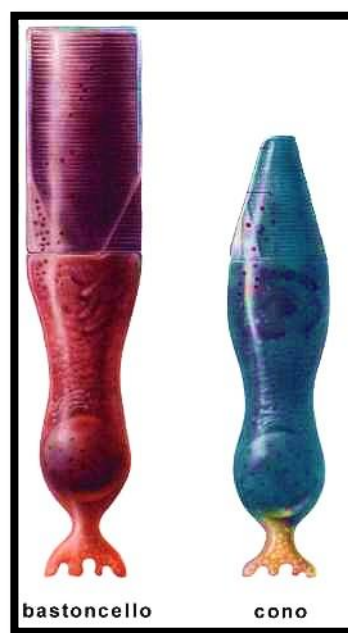


Figura 1.1. Bastoncello e cono.

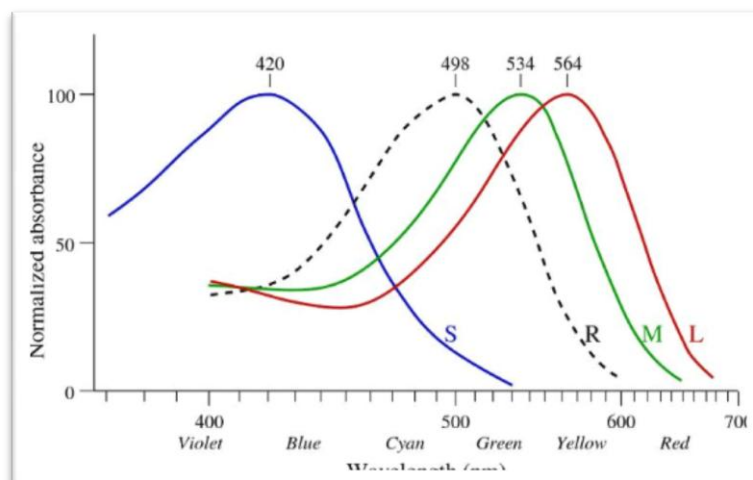


Figura 1.2. Curve di sensibilità spettrale, rispettivamente dei coni S, M e L. La curva tratteggiata indica l'assorbimento dei bastoncelli.

Pertanto, tre parametri corrispondenti ai livelli di stimolo dei tre tipi di coni in linea di principio descrivono qualsiasi sensazione di colore umano. La ponderazione di uno spettro di potenza luminosa totale in base alle singole sensibilità spettrali dei tre tipi di coni genera tre valori effettivi di stimolo; questi tre valori compongono una *specificazione* tristimolo del colore oggettivo della radiazione riflessa da un oggetto. I tre parametri, indicati con "S", "M" e "L", sono indicati usando uno spazio tridimensionale denominato "spazio colore LMS", che è uno dei tanti spazi cromatici ideati per quantificare la visione del colore (cf. Capitolo 2).

I coni di tipo S sono presenti in quantità minore (circa il 10%) rispetto ai restanti tipi di coni e sono assenti al centro della fovea (la regione centrale della retina). In generale i coni L sono più numerosi dei coni M, con quantità diverse a seconda dei soggetti, senza però che questo causi delle divergenze sulla resa della percezione visiva a colori. La diversa proporzione dei tre coni e la loro differente posizione e variabilità nella retina rende la visione dei colori non dipendente semplicemente dalla combinazione delle loro curve di sensibilità spettrale normalizzate, con i corrispettivi massimi posti all'unità: importante e significativo è ricordare, ad esempio, che, a fronte di una minore numerosità, la sensibilità non normalizzata dei coni M è molto più alta di quella degli altri due tipi.

I segnali generati dai coni vengono trasmessi a specifiche cellule nervose dell'occhio umano e poi al cervello; l'informazione visiva percepita viene rielaborata dalle varie parti del cervello in diverse maniere, principalmente secondo segnali a colori-opponenti, ossia attivando una parte del cervello piuttosto che un'altra se vengono percepite radiazioni di lunghezze d'onda diverse ("radiazioni rosse" piuttosto che "radiazioni verdi").

Il modo in cui le informazioni vengono rielaborate dal cervello è in accordo con la teoria di Hering²⁰, secondo cui l'uomo è sensibile a quattro colori primari (il rosso, il giallo, il verde e il blu) e la visione dei colori è regolata secondo gli oppositori: verde/rosso, giallo/blu e bianco/nero.

Oltre all'aspetto più anatomico del sistema visivo umano esistono altri fattori, più psicologici, che influenzano la percezione del colore, e nel paragrafo successivo verranno descritte alcune di queste dinamiche.

1.2. La percezione del colore

Il colore "appare" come una proprietà intrinseca del materiale che l'osservatore coglie in maniera immediata, come la grandezza o la distanza degli oggetti che ci circondano nel nostro vivere quotidiano. Per quanto questa proprietà sia immediata per l'osservatore, è anche "mediata": infatti nel momento in cui le radiazioni luminose riflesse da un oggetto incidono sull'occhio dell'osservatore diversi sono i fattori che influenzano e determinano i colori percepiti dell'oggetto osservato. I metameri esprimono perfettamente quanto sopra descritto: con il termine *metamerismo*, infatti, si esprime la stessa percezione di colore di superfici aventi spettri di riflettanza diversi (in quanto, da un lato, l'essere umano tende a raggruppare riflettanze spettrali diverse nel medesimo colore) o, viceversa, la percezione di un colore diverso, a seconda della sorgente con la quale il campione viene illuminato (Figura 1.3); per inciso, anche la macchina

²⁰ C. Oleari, *Misurare il colore. Fisiologia della visione a colori. Fotometria-Colorimetria e norme internazionali*, Hoepli, 2016.

fotografica soffre di questo fenomeno, ossia un medesimo colore può risultare “diverso” a seconda della natura del campione o della fonte di illuminazione^{21,22}.

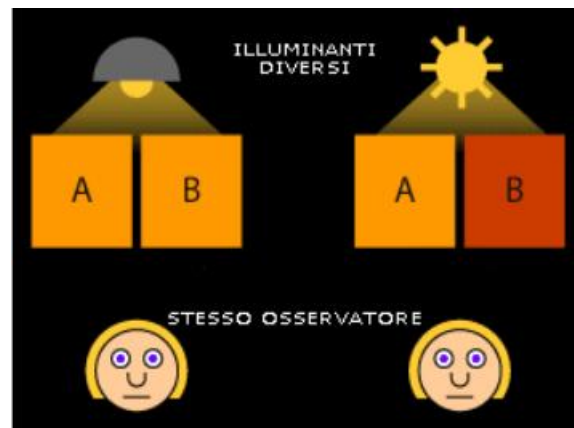


Figura 1.3. Esempio di metamerismo: il materiale B risulta di colore diverso in funzione del colore della sorgente luminosa.

Altro aspetto da considerare nell'apparire del colore è la distinzione esistente tra il *colore di superficie* e il *colore di riduzione*. La prima espressione indica una proprietà ben definita nello spazio, contornata da bordi precisi e quasi sempre associata ad una *texture* ossia ad una microstruttura della superficie che contribuisce a identificarla e caratterizzare il colore dell'oggetto stesso. La seconda espressione, ossia il *colore di riduzione*, indica regioni omogenee, prive di microstrutture, come il cielo o il nero profondo delle aperture delle grotte. Principalmente, come confermato dagli studi di Kanizsa²³, la differenza di gradiente induce una diversa percezione del colore degli oggetti osservati: una regione contornata da gradienti netti rispetto allo sfondo, cioè una superficie i cui bordi sono netti e ben definiti dallo sfondo, è percepita cromaticamente più distaccata dallo sfondo rispetto a regioni i cui gradienti o bordi risultano più gradualmente sfumati con lo sfondo.

Il contesto nel quale viene un oggetto osservato è un ulteriore fattore che influenza la percezione del colore: a seconda dello sfondo, lo stesso oggetto questo può apparire con diversi gradi di luminosità²⁴, come risulta evidente dalla Figura 1.4.

Un ulteriore aspetto da considerare nel valutare e descrivere la percezione del colore di un campione in esame, oltre al contesto che lo circonda, è il tipo d'illuminamento: diffuso o localizzato. Quest'ultimo può causare una diversa percezione del colore perché un illuminamento localizzato causa la coincidenza tra i bordi di riflettanza della superficie osservata e i bordi d'illuminazione. Un esempio è l'effetto Gelb²⁵ descritto in Figura 1.5: in una stanza scarsamente illuminata si appendono al soffitto due dischi, uno nero e uno bianco, illuminando con luce localizzata solo il disco nero; l'osservatore, a cui rimane nascosta la sorgente luminosa, giudicherà i due dischi uguali,

²¹ Hunt R.W.G., Pointer M.R., *Measuring colour*, A. John Wiley & Sons, 2011.

²² Finlayson G.D., Mackiewicz M., Hurlbert A., *Color Correction Using Root-Polynomial Regression*, IEEE transactions on image processing, VOL.25, 2015.

²³ Gaetano Kanizsa (1913-1993) è considerato uno dei maggiori esponenti della ricerca percettologica italiana. Si definiva infatti uno studioso dei processi cognitivi, in particolare di quelli percettivi.

²⁴ Spillmann L., *From elements to perception: Local and global processing in visual neurons*, Sage journals, 1999.

²⁵ Galmonte A., Corso in *Psicologia generale*, Scuola di Medicina e Chirurgia, Università degli Studi di Verona.

perché i bordi del disco nero coincidono con i bordi d'illuminamento della sorgente a irraggiamento localizzato.



Figura 1.4. Esperimento di Hering, oggetti quantitativamente di pari luminosità (luminanza) possono risultare percettivamente (qualitativamente) diversi a seconda dello sfondo.

In conclusione, la percezione del colore non dipende soltanto dalla riflessione, da parte della superficie dell'oggetto osservato, di radiazioni appartenenti alla regione spettrale del visibile che colpiscono i fotorecettori dell'occhio umano, ma anche dal contesto che definisce l'intero campo visivo; esistono a tale riguardo diversi studi svolti soprattutto in ambito psicologico, in particolare sulla base della teoria psicoanalitica della *Gestalt*, corrente incentrata sulla tematica della percezione²⁶.

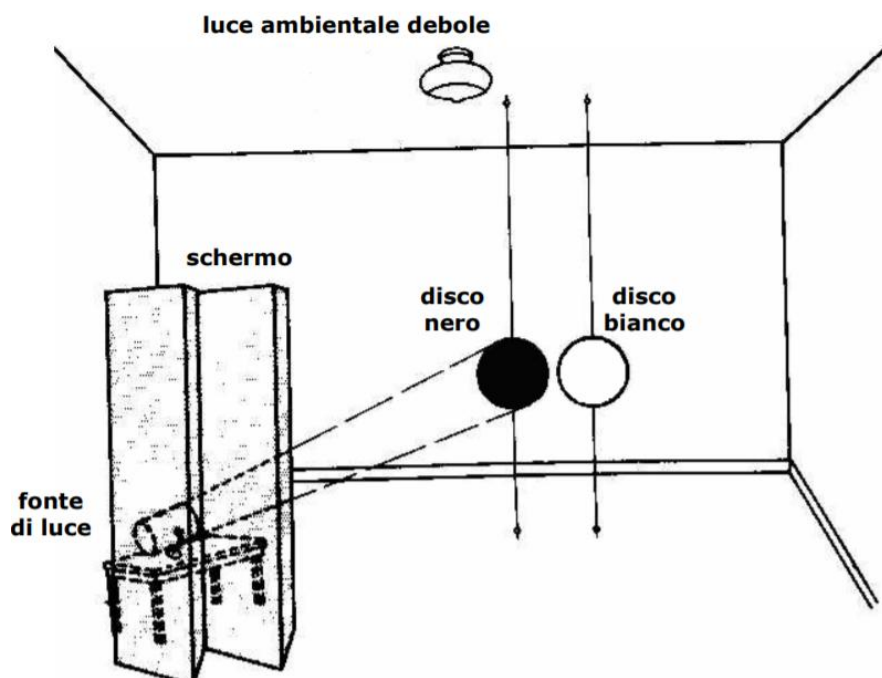


Figura 1.5. Descrizione dell'effetto Gelb.

²⁶ Kanizsa G., Grammatica del vedere – Saggi su percezione e gestalt, IL MULINO, 1997.

Capitolo 2

La colorimetria

Compito principale della colorimetria è la *specificazione* del colore mediante valori numerici oggettivi, secondo le indicazioni della Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). Quest'ultima, fin dalla sua fondazione, nel 1913, si è impegnata nella definizione di linee guida per l'applicazione di principi e procedure di metrologia per lo sviluppo di norme nazionali ed internazionali nei settori scientifici che studiano tanto la luce quanto l'illuminamento. La CIE fornisce anche un forum internazionale per la discussione delle problematiche di carattere scientifico, tecnologico e culturale inerenti il mondo della luce e dell'illuminamento, così come mantiene ampi rapporti con organizzazioni internazionali del settore²⁷.

La *specificazione* del colore è stata realizzata quantificando e standardizzando i risultati ottenuti da diversi esperimenti sulla luce e sul colore; questi esperimenti prevedevano la valutazione delle risposte fornite da osservatori posti di fronte a pannelli aventi determinate caratteristiche e illuminati da radiazioni specifiche. La CIE ha fornito regole diverse per svolgere questi esperimenti a seconda dell'obiettivo desiderato, e i diversi modelli matematici ottenuti si distinguono, generalizzando, in tre grandi tipologie in base al set di condizioni sperimentali adottato:

- a) modelli i cui dati si riferiscono alle risposte fornite dall'osservatore standard "2 gradi" (2°), ossia un osservatore messo in condizioni tali da avere una visione esclusivamente foveale, in cui le radiazioni riflesse dalla superficie in esame attivavano solo i coni nell'area della fovea ("osservatore" CIE 1913);
- b) modelli basati sulle risposte ricevute dall'osservatore standard "10 gradi" (10°), cioè in visione extra-foveale ("osservatore" CIE 1964);
- c) modelli che si basano su diversi *illuminanti*, definendo come *illuminante* un emettitore di luce ove per ogni radiazione emessa è definita e convenuta la sua distribuzione spettrale di potenza; gli illuminanti vengono utilizzati per il calcolo colorimetrico e possono essere distinti in diversi tipi; la CIE definisce alcuni illuminanti standard, indicati con la lettera D (*daylight*) seguita da un codice numerico (ad esempio D65) che indica il colore prossimale espresso in Kelvin. Ad esempio, l'illuminante utilizzato nel mio progetto è il D65, dove D indica, appunto, radiazioni che simulano la luce di giorno e 65 sta per 6500 Kelvin, cioè la sua temperatura di colore. Altri illuminanti definiti dalla CIE sono indicati dalle lettere A, B, C o F a seconda delle diverse specifiche.

I risultati degli esperimenti sopra menzionati, sono stati combinati nella *specificazione* dello spazio colore CIE RGB, da cui è stato derivato lo spazio colore CIE XYZ. Questi spazi colore sono ancora ampiamente utilizzati, come ad esempio nello spazio colore CIELUV (1976 (cf. Paragrafo 2.2).

La *specificazione* del colore può avvenire in diversi modi a seconda che vengano analizzati:

²⁷ Associazione Internazionale Produttori Illuminazione: www.Assil.it

1. la *sensazione del colore*, ossia l'esperienza che ha un soggetto nel momento in cui una radiazione elettromagnetica attiva i fotorecettori;
2. lo *stimolo del colore*, cioè il flusso radiante capace di produrre la sensazione di un colore;
3. la *percezione del colore*, cioè quel fenomeno complesso definibile come una impressione di colore soggettiva, condizionata dalla situazione d'osservazione e frutto di una interpretazione mentale (cf. Capitolo 1).

In sintesi, la *specificazione* del colore può essere distinta in:

- *specificazione psicofisica*: analizza la *sensazione del colore*, ossia l'esperienza soggettiva che avviene nel momento in cui una radiazione elettromagnetica attiva i fotorecettori;
- *specificazione psicometrica*: analizza la *percezione del colore* ossia l'impressione percepita del colore, dipendente dalle condizioni di osservazione;
- *specificazione mediante atlanti*.

2.1. Specificazione psicofisica del colore

La psicofisica è una branca della psicologia che studi i rapporti che legano i fenomeni psichici ai fenomeni fisiologici; si pone come obiettivo quello di spiegare le relazioni tra uno stimolo e la risposta del nostro organismo: ad esempio la risposta del nostro sistema visivo alla radiazione elettromagnetica. Questa disciplina si fonda su due concetti base:

1. stimoli fisicamente diversi possono essere percepiti in modo indistinguibile, come nel caso del *metamerismo* (cf. Paragrafo 1.2);
2. il funzionamento di un processo percettivo è ben caratterizzato dalla sua capacità di rilevare differenze tra stimoli diversi (sensibilità): una buona sensibilità riesce a distinguere stimoli fisicamente poco dissimili²⁸.

In questo ambito dello studio del colore vengono prese in esame due delle sue caratteristiche:

- la *luminanza*
- la *cromaticità*

La *luminanza*, $L(\lambda)$ (rapporto tra l'intensità luminosa emessa da una sorgente nella direzione dell'osservatore e l'area apparente della superficie emittente, così come vista dall'osservatore), è una grandezza estremamente importante non solo in colorimetria ma anche in fotometria: questa disciplina si occupa infatti della misurazione formale della luce visibile in unità proprie del sistema visivo umano, ossia studia l'*efficienza spettrale fotonica luminosa relativa* $V(\lambda)$, una grandezza che quantifica la sensibilità dell'occhio umano alle diverse radiazioni monocromatiche nel dominio del visibile a livelli tali che come fotorecettori siano attivati solo i coni. Il termine "*relativa*" è legato al fatto che il valore massimo della funzione è posto uguale ad 1 e non presenta unità di misura: è, cioè, adimensionale. La *luminanza* è una delle grandezze più importanti in colorimetria perché

²⁸ Bruno N., *Elementi di Psicofisica*, Dispensa per il corso Percezione e Psicofisica, corso di Laurea Specialistica in Psicobiologia e Neuroscienze Cognitive, Università degli Studi di Parma, 2016.

indica il flusso luminoso uscente dal corpo osservato per unità di angolo solido e per unità di area proiettata su un piano normale alla direzione considerata. Il flusso radiante è il flusso radente (cioè il flusso luminoso per unità di tempo) pesato secondo l'efficienza spettrale fotopica luminosa relativa $V(\lambda)$. In poche parole, la *luminanza* è la luce che incide sulla retina ed attiva i fotorecettori, quantificata secondo il sistema visivo umano.

La *cromaticità* può essere espressa dalla *lunghezza d'onda dominante* e dalla *purezza*, ossia, rispettivamente, *tinta* e *saturazione* (cioè quanto il colore osservato differisce dal bianco).

La *specificazione psicofisica* del colore focalizza la sua attenzione sull'attivazione dei coni nel momento in cui assorbono delle radiazioni luminose; la quantificazione di questo fenomeno è descrivibile mediante lo spazio del tristimolo dove i colori sono descritti in chiave vettoriale da tre coordinate, ognuna delle quali descrive la risposta fornita da un tipo specifico di cono (L, M, S); principalmente si possono individuare tre sistemi di riferimento²⁹:

- il sistema di riferimento del tristimolo, in cui le componenti dei vettori sono proporzionali all'attivazione dei tre tipi di coni e sono quindi grandezze sempre positive;
- il sistema di riferimento tipo RGB, in cui gli stimoli di riferimento sono dovuti a tre radiazioni primarie, come conseguenza dei diversi intervalli spettrali a cui sono sensibili i diversi coni;
- il sistema XYZ, definito dalla CIE nel 1931, in cui la componente Y è proporzionale alla luminanza; le componenti dei vettori sono sempre positive.

Un diverso modo per esprimere la cromaticità è il diagramma (o spazio) di cromaticità (Figura 2.1), ossia l'insieme dei punti indicanti l'intersezione dei vettori tristimolo con il piano unitario, cioè il piano che interseca gli assi fondamentali del sistema di riferimento rispettivamente nei punti (1,0,0), (0,1,0) e (0,0,1). Il contorno curvilineo del diagramma descrive i colori "spettrali" mentre il contorno rettilineo, la linea della porpora, indica quei colori definiti "non spettrali".

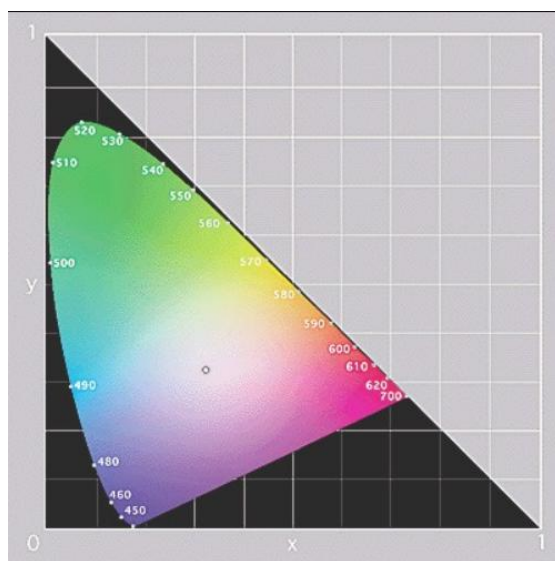


Figura 2.1. Esempio di diagramma di cromaticità.

²⁹ C. Oleari, *Misurare il colore. Fisiologia della visione a colori. Fotometria-Colorimetria e norme internazionali*, Hoepli, 2016.

Tramite il diagramma di cromaticità è possibile calcolare la purezza e la lunghezza d'onda dominante. In Figura 2.2 **W** rappresenta il punto acromatico, ossia il bianco della sorgente luminosa, mentre **P** indica il punto intersezione del vettore tristimolo con il piano contenente il diagramma di cromaticità; quindi **P** indica il colore percepito e per comprendere la sua lunghezza d'onda dominante, ossia la sua *tinta*, è sufficiente prolungare il segmento **WP** verso il perimetro del diagramma: la loro intersezione, il punto **D**, indica la lunghezza d'onda dominante. La purezza si calcola invece considerando il rapporto tra i segmenti **WP** e **WD**. Il punto **C** indica la lunghezza d'onda complementare al colore considerato.

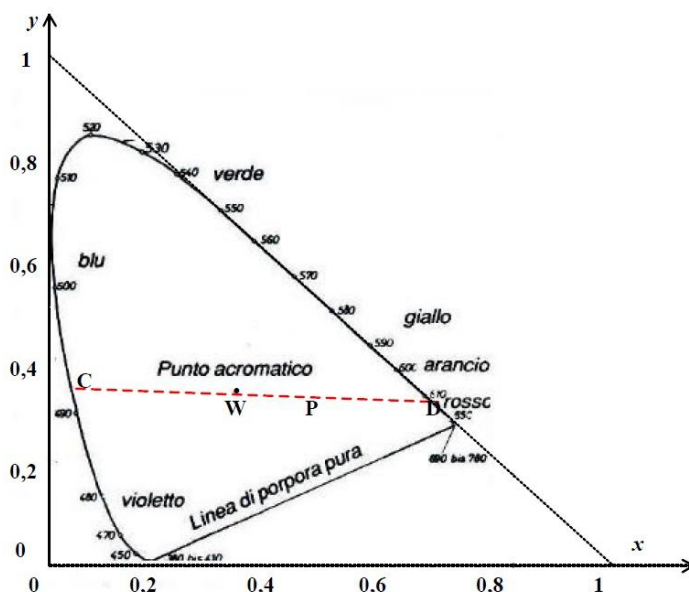


Figura 2.2. Diagramma di cromaticità: segmenti relativi alla lunghezza d'onda dominante, alla purezza e al colore complementare della colorazione considerata.

Un ulteriore approfondimento per quanto riguarda lo spazio psicofisico riguarda la disomogeneità di scala nello spazio del tristimolo: l'attribuzione di uno stimolo di colore ad un vettore nello spazio del tristimolo avviene tramite l'eguagliamento dei colori. Nel ripetere più volte questa operazione si ottengono più vettori descriventi il "medesimo" stimolo e i risultati possono essere descritti tramite una distribuzione gaussiana definita da un suo vettore medio e una matrice di covarianza. Se si riportano questi dati su un diagramma di cromaticità la figura che si ottiene non è un cerchio con al centro la media e raggio pari alla deviazione standard ma un'ellisse perché la scala cromatica è disomogenea (Figura 2.3). Questo fenomeno, definito appunto attraverso le ellissi di MacAdam (colui che studiò questo fenomeno), risulta essere una delle problematiche più rilevanti nel settore della colorimetria, tuttora non completamente risolta.

I colori contornati dalle ellissi di MacAdam vengono interpretati come uguali: in Figura 2.3, ad esempio, i verdi circoscritti dall'ellisse più grande, avente un centro di coordinate (0.2,0.7) circa sono visti come simili tra loro. In particolare è da notare come verdi posti agli estremi dell'asse maggiore siano percepiti simili a verdi posti agli estremi dell'asse minore, cioè a distanze diverse, e quindi come la scala colorimetrica non sia omogenea: questo fenomeno ha delle conseguenze nel misurare e calcolare i colori stessi, in quanto il modello matematico che li definisce non è omogeneo.

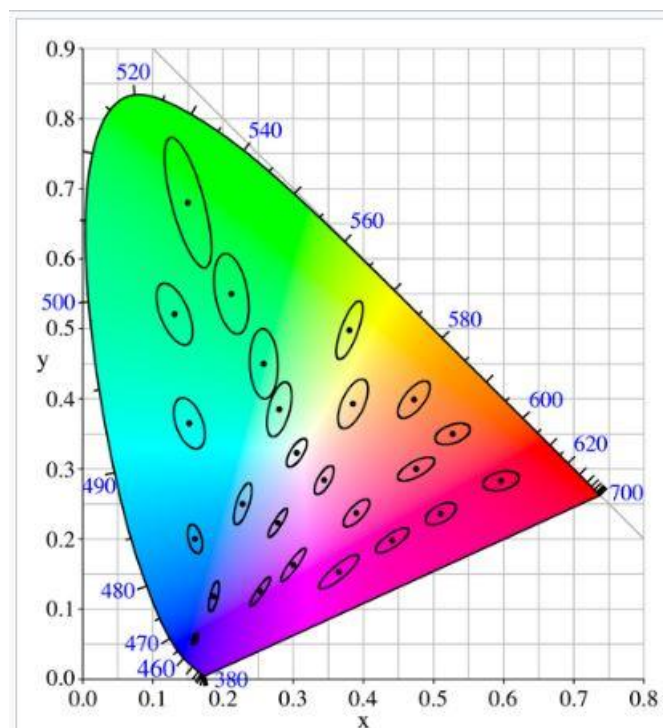


Figura 2.3. Ellissi di MacAdam sul diagramma di cromaticità.

2.2. Specificazione psicometrica del colore: i sistemi CIE1976

Questa *specificazione* ha lo scopo di fornire spazi colore che descrivano il colore come lo si percepisce nella vita quotidiana; tali spazi, a loro volta, hanno come assi di riferimento le direzioni definite dalle tre *opponenze* proposte da Hering (Paragrafo 1.1). Il colore misurato è il colore d'oggetto, quindi il colore spalmato su una superficie delimitata da bordi netti e nitidi: il colore, pertanto, non è solo il risultato della attivazione dei coni, ma di altri fattori come il tipo d'illuminazione o il contrasto tra oggetto in esame e relativo sfondo. Questi sistemi sono approssimativi ed inadeguati a descrivere il fenomeno dell'apparenza del colore nella sua complessità perché, come intuibile da quanto sopra descritto, il sistema considera solo il caso in cui l'osservatore stia guardando un colore d'oggetto contornato da un grigio medio e che l'illuminante non sia troppo differente dalla luce diurna (come un D50, cioè la luce di giorno, paragonabile ad una temperatura di colore di 5000K, o un D65 cioè la luce diurna nei paesi del Nord Europa approssimabile ad una temperatura di colore di 6500K). Questi sistemi sono ottenuti, soprattutto nel caso del CIELab, da trasformazioni non lineari dallo spazio del tristimolo XYZ: pertanto in questi sistemi non ha alcun significato fisico la somma algebrica tra vettori colore; tuttavia è definita in essi la distanza tra colori, essendo spazi metrici, e quindi è possibile quantificare la differenza di colore.

Di solito i termini usati vengono accompagnati dall'aggettivo "percepito" se soggettivi, "psicometrico" se oggettivi; i sistemi CIE1976 propongono specifiche psicometriche, per cui i vari termini dovrebbero essere accompagnati dall'aggettivo psicometrico, il quale, tuttavia è tralasciato senza creare ambiguità.

Le specificazioni del colore sono descritte come funzioni di risposta visiva e definite, principalmente, in spazi colore come il CIELUV e il CIELab.

Lo spazio CIELab, il modello utilizzato in questo progetto di dottorato, è paragonabile tridimensionalmente a una sfera dove il colore è descritto dalla coordinata L^* , indicante la chiarezza o luminanza (cf. Paragrafo precedente), e dalle coordinate a^* e b^* (Figura 2.4) di cromaticità. Lo spazio CIELab può anche essere descritto in coordinate polari C^* , il *croma* (o *chroma*), e h (o H), l'*angolo di tinta*, rispettivamente indicanti la purezza e la lunghezza d'onda dominante del colore in esame (Figura 2.5).

La chiarezza, o luminanza, L^* , è espressa come:

$$L^* = 116(Y / Y_n)^{1/3} - 16 \quad \text{per } (Y / Y_n) > (6 / 29)^3$$

$$L^* = l(Y / Y_n), \text{ con } l = (29 / 3)^3 = 903,3 \quad \text{per } (Y / Y_n) \leq (6 / 29)^3 \quad (2.1)$$

dove Y è il fattore di luminanza dello stimolo in esame, ossia il rapporto percentuale tra la luminanza dello stimolo e quella del diffusore riflettente ideale (il bianco ideale), e Y_n , invece, si riferisce al fattore di luminanza percentuale del bianco di riferimento o diffusore ideale (coordinate $(X_n, Y_n = 100, Z_n)$).

La chiarezza L^* è definita nell'intervallo 0-100 e come funzione di Y passa dall'andamento secondo radice cubica a quello lineare, evitando di assumere valori negativi quando $Y = 0$.

Le coordinate a^* , b^* sono così calcolate:

$$a^* = 500 \left[(X / X_n)^{1/3} - (Y / Y_n)^{1/3} \right] \quad (2.2)$$

$$b^* = 200 \left[(Y / Y_n)^{1/3} - (Z / Z_n)^{1/3} \right] \quad (2.3)$$

Se uno dei rapporti $(X/X_n), (Y/Y_n), (Z/Z_n)$ è minore o uguale a $(6/29)^3 \approx 0,008856 \Rightarrow$ la radice cubica nelle equazioni (2.2 e 2.3) è sostituita da $[(841/108)^F + (16/116)]$ dove F è il rapporto in esame e $841/108 \approx 7,787$.

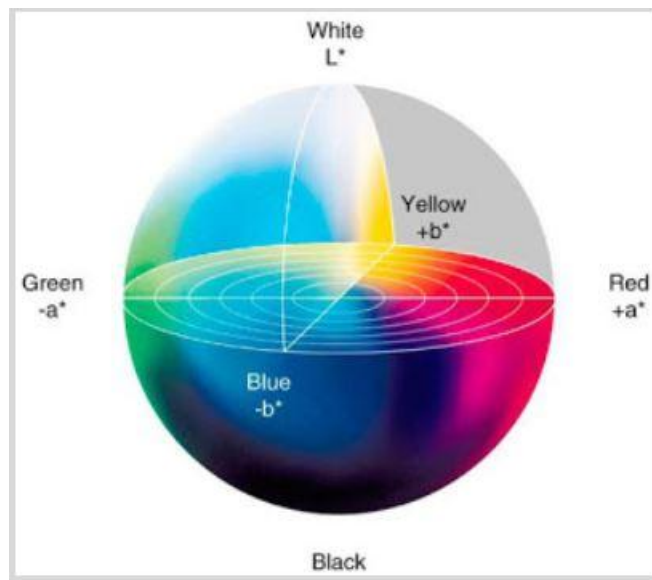


Figura 2.4. Spazio colorimetrico CIELab

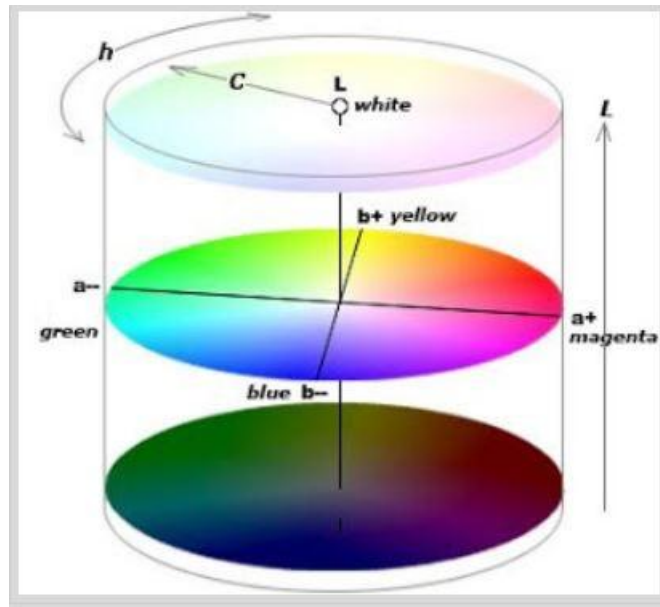


Figura 2.5. Coordinate polari nello spazio CIELab.

La sezione circolare, ottenuta dall'intersezione di un piano perpendicolare all'asse della chiarezza L^* con lo spazio CIELab, descrive tutti i colori aventi la stessa chiarezza L^* ; inoltre è possibile definire le coordinate polari che individuano in tale spazio il campione misurato:

$$h = \arctan[b^* / a^*] \quad (2.4)$$

$$C_{ab}^* = [a^{*2} + b^{*2}]^{1/2} \quad (2.5)$$

Il sistema CIELab vale sia per l'osservatore standard 2° (detto anche CIE 1931) che 10° (definito CIE 1964) nei diversi illuminanti di riferimento (D65, D50).

2.2.1. La differenza colorimetrica

Questo parametro ha lo scopo precipuo di definire una distanza che abbia un significato univoco, oggettivo e soddisfi alle condizioni degli spazi metrici. Nello specifico si cerca una distanza uniforme che riproduca in modo omogeneo la sensazione di similitudine tra i colori del sistema visivo umano.

Gli spazi CIELab e CIELUV sono stati introdotti anche per specificare numericamente (cioè quantificare) le differenze colorimetriche tra campioni colorati in accordo con la valutazione visiva umana. Quest'ultima condizione, ossia che la differenza colorimetrica calcolata in questi spazi sia concorde con quanto percepito dall'occhio umano, ha indotto la CIE a definire esattamente le condizioni affinché un osservatore dotato di una visione dei colori "normale" possa valutare la differenza tra colori di campioni diversi. Così, ad esempio, la sorgente luminosa deve simulare l'illuminante D65, il campo visivo deve essere maggiore di 4° (quindi una sorta di osservatore standard 10°), i campioni devono essere disposti a contatto con uno sfondo grigio, con chiarezza $L^* = 50$, e la differenza tra campioni non deve essere maggiore di 5 unità colorimetriche.

A seguito di questi esperimenti è stata acquisita una notevole mole di dati e, in particolare, una parte di questi dati è sintetizzata in un insieme di ellissi a chiarezza costante, dette ellissi BFD; le ellissi hanno come centri le descrizioni colorimetriche dei corrispettivi campioni e come contorni le relative soglie di discriminazione della percezione visiva di questi: praticamente definiscono i limiti entro cui il colore del campione risulta simile e ovviamente si tratta di ellissi e non circonferenze a seguito della mancata omogeneità della scala colorimetrica. Le ellissi BFD, come le ellissi di MacAdam,³⁰ sono studi svolti per comprendere le differenze colorimetriche, e ognuna di queste ellissi viene definita sulla base dei campioni analizzati, dei metodi comparativi utilizzati e dei centri colore indagati.

La maggior parte delle differenze colorimetriche è stata sviluppata sulla base dello spazio CIELab: questo spazio risulta particolarmente idoneo ed apprezzato nel settore del colore industriale (non solo nella produzione di vernici o pitture ma anche nel tessile, ad esempio), e la CIE nel 1976 fornì una formula semplice quale la ΔE^*_{ab} ; questa si basava sulla distanza Euclidea e per quanto fosse immediata nell'utilizzo non era sufficientemente affidabile nel calcolare le piccole/medie differenze, ossia presentava delle imprecisioni per differenze colorimetriche $\Delta E^*_{ab} < 5$ unità colorimetriche. Nel 1987 la CIE raccomandò di studiare la formula basandosi su cinque centri colore che includevano il grigio, il rosso, il verde, blu e il giallo; successivamente i centri furono ampliati a 19. Fu poi introdotto la CMC(l:c), formula sviluppata dalla CMC (Colour Measurement Committee) della SDC (Society of Dyers and Colourists) sulla base di campioni tessili. La formula CMC (L:C), dove "L" indica la chiarezza e "C" il chroma, risultava più performante rispetto alla prima sopra citata nel caso di piccole differenze. Successive formule furono studiate per incrementare ed ottimizzare quanto sviluppato: la BFD(l:c) fu definita da Luo e Rigg presso l'Università di Bradford, basandosi su 500 coppie di campioni in lana e applicando il metodo della scala di grigio. Quest'ultimo approccio, ampiamente utilizzato nell'industria tessile, consiste nel confrontare la differenza colorimetrica tra una coppia di stimoli con la differenza in chiarezza (L^*) di una serie di campioni di grigio.

Altra formula proposta è la CIE94, equazione proposta da Berns utilizzando 156 coppie di campioni dipinti ed analizzando 19 centri colore. Questo *dataset* è conosciuto come RIT-DuPont. Successivamente Kim e Nobbs definirono un'ulteriore formula, la LCD (Leeds Color Difference), avvalendosi di un *dataset*, denominato Leeds, composto 243 e 104 coppie di campioni dipinti e confrontati anche con il metodo della scala di grigio. Ulteriore studio fu svolto da Witt concentrandosi su 418 campioni dipinti e descriventi 19 centri colore e confrontandoli con il metodo della scala di grigi. Nel 2001 fu proposta da Luo, Cui e Rigg la formula CIEDE2000³¹ basandosi su una combinazione dei *dataset* sopra descritti: BFD, RIT-DuPont, Leeds e Witt, quest'ultima equazione venne standardizzata dalla CIE come formula per calcolare la differenza colorimetrica³².

In questo progetto di ricerca le differenze colorimetriche verranno valutate utilizzando la formula CIEDE2000, sia perché la formula è stata sviluppata soprattutto su *dataset* costituiti da

³⁰ Luo M.G., Rigg B., *Chromaticity-discrimination ellipses for surface colors*, Color Research Application, 1986.

³¹ Luo M.G., Cui G., Rigg B., *The development of the CIE2000 colour difference formula: CIEDE2000*, Color Research Application, 2001.

³² Mirjaili F., Luo M.R., Cui G., Morovic J., *A color-difference formula for evaluating color pairs with no separation- ΔE_{NS}* , Journal of the Optical Society of America A, 2019.

campioni, in coerenza con i tipi di campioni da me studiati (campiture ad olio dipinte su una tela o tavola: Capitolo 6), sia per quanto riscontrato in letteratura sul monitoraggio colorimetrico su beni storico-culturali^{33, 34}.

A seguire riporto la formula CIEDE2000 da me adoperata con le implementazioni di Sharma, Wu e Dalal³⁵:

$$\begin{aligned}
 \Delta E_{00}(L_1^*, a_1^*, b_1^*; L_2^*, a_2^*, b_2^*) &= \Delta E_{00}^{12} = \Delta E_{00}. \\
 C_{i,ab}^* &= \sqrt{(a_i^*)^2 + (b_i^*)^2} \quad i=1, 2 \\
 \bar{C}_{ab}^* &= \frac{C_{1,ab}^* + C_{2,ab}^*}{2} \\
 G &= 0.5 \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}_{ab}^{*7}}{\bar{C}_{ab}^{*7} + 25^7}} \right) \\
 a_i' &= (1+G)a_i^* \quad i=1, 2 \\
 C_i' &= \sqrt{(a_i')^2 + (b_i^*)^2} \quad i=1, 2 \\
 h_i' &= \begin{cases} 0 & b_i^* = a_i' = 0 \\ \tan^{-1}(b_i^*/a_i') & \text{otherwise} \end{cases} \quad i=1, 2 \\
 \Delta L' &= L_2^* - L_1^* \\
 \Delta C' &= C_2' - C_1' \\
 \Delta h' &= \begin{cases} 0 & C_1' C_2' = 0 \\ h_2' - h_1' & C_1' C_2' \neq 0; |h_2' - h_1'| \leq 180^\circ \\ (h_2' - h_1') - 360 & C_1' C_2' \neq 0; (h_2' - h_1') > 180^\circ \\ (h_2' - h_1') + 360 & C_1' C_2' \neq 0; (h_2' - h_1') < -180^\circ \end{cases} \\
 \Delta H' &= 2 \sqrt{C_1' C_2'} \sin\left(\frac{\Delta h'}{2}\right) \\
 \bar{L}' &= (L_1^* + L_2^*)/2 \\
 \bar{C}' &= (C_1' + C_2')/2
 \end{aligned} \tag{2.6.1}$$

³³ Barbu O-H, Zahariade A., *Non invasive In Situ Study of Pigments in Artworks by Means of VIS, IRFC Image Analysis and X-Ray Fluorescence Spectrometry*, Color Research & Application, 2016.

³⁴ Barbu O-H, Dima C., Stefanica A., Nicolau H., "Pigment X" application for pigment identification, Conference The twelfth Biennial Infrared & Raman Users Group Conference, Ormyli, Greece, 2016.

³⁵ Sharma G., Wu W., Dalal E.N., The CIEDE2000 Color-Difference Formul: Implementation Notes, Supplementary Test Data, and Mathematical Observations, Color Research & Application, 2004.

$$\bar{h}' = \begin{cases} \frac{h'_1 + h'_2}{2} & |h'_1 - h'_2| \leq 180^\circ; C'_1 C'_2 \neq 0 \\ \frac{h'_1 + h'_2 + 360^\circ}{2} & |h'_1 - h'_2| > 180^\circ; (h'_1 + h'_2) < 360^\circ; \\ & C'_1 C'_2 \neq 0 \\ \frac{h'_1 + h'_2 - 360^\circ}{2} & |h'_1 - h'_2| > 180^\circ; (h'_1 + h'_2) \geq 360^\circ; \\ & C'_1 C'_2 \neq 0 \\ (h'_1 + h'_2) & C'_1 C'_2 = 0 \end{cases} \quad (2.6.2)$$

$$T = 1 - 0.17 \cos(\bar{h}' - 30^\circ) + 0.24 \cos(2\bar{h}') \\ + 0.32 \cos(3\bar{h}' + 6^\circ) - 0.20 \cos(4\bar{h}' - 63^\circ)$$

$$\Delta\theta = 30 \exp\left\{-\left[\frac{\bar{h}' - 275^\circ}{25}\right]^2\right\} \quad (2.6.3)$$

$$R_C = 2 \sqrt{\frac{\bar{C}'}{\bar{C}' + 25}}$$

$$S_L = 1 + \frac{0.015(\bar{L}' - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L}' - 50)^2}}$$

$$S_C = 1 + 0.045\bar{C}'$$

$$S_H = 1 + 0.015\bar{C}'T$$

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta)R_C$$

$$\Delta E_{00}^{12} = \Delta E_{00}(L_1^*, a_1^*, b_1^*, L_2^*, a_2^*, b_2^*) = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)}. \quad (2.6.4)$$

dove con L_1^*, a_1^*, b_1^* e L_2^*, a_2^*, b_2^* si indicano le coordinate colorimetriche dei campioni in esame.

I parametri K_L, K_C, K_H , rispettivamente legati alla chiarezza L^* , al chroma C^* ed all'angolo di tinta H vengono calcolati in funzione dei parametri di visione dei campioni da parte dell'osservatore standard: dipendono, ad esempio, dalla tessitura dei campioni, dallo sfondo o dalla distanza esistente tra i campioni di cui si vuole valutare la differenza colorimetrica³⁶. Nello svolgere i calcoli ho preferito porre $K_L = K_C = K_H = 1$, come usualmente suggerito in letteratura³⁷.

S_L, S_C, S_H sono le funzioni pesate che meglio si accordano con i dati colorimetrici rispettivamente per la chiarezza L^* , il chroma C^* e l'angolo di tinta H .

³⁶ Luo M.G., Cui G., Rigg B., *The development of the CIE2000 colour difference formula: CIEDE2000*, Color Research Application, 2001.

³⁷ Oleari C., *Misurare il colore. Fisiologia della visione a colori. Fotometria-Colorimetria e norme internazionali*, Hoepli, 2016.

La funzione R_T è invece stata calcolata per migliorare il fit delle differenze cromatiche nella regione del blu, le ellissi BFD: infatti, nella regione del blu sono diversamente orientate rispetto alle restanti regioni (del rosso, del verde e del giallo), per cui è stata necessaria una ulteriore funzione adattiva.

I punti 2.6.1, 2.6.2 e 2.6.3 dell'equazione sopra descritta, come suggeriscono Sharma, Wu e Dalal³⁸, presentano delle discontinuità che, tuttavia, risultano poco rilevanti ed influenti quando quest'equazione viene utilizzata per calcolare la differenza tra colori simili tra loro, quindi aventi differenze inferiori a 5 unità colorimetriche.

2.3. *Specificazione mediante atlanti*

Lo studio del colore mediante l'utilizzo, per l'appunto, di atlanti cioè raccolte di campioni fisici di uguale materiale, quale carta, tessuto, plastica, ecc..., viene realizzato secondo un sistema di ordinamento dei colori: un esempio di atlante è il libro dei colori di Munsell.

Il sistema Munsell permette di identificare il colore di una superficie tramite confronto visivo diretto tra la colorazione del campione in esame e quella di un campione standard (tessera rimovibile) dell'atlante di Munsell (Figura 2.6). Esistono altre raccolte per la specificazione del colore ma questa risulta essere tra le più usate ed è, inoltre, indicata dall'Ente Nazionale Italiano di Unificazione (Uni) come strumento per l'identificazione e la codifica dei colori (Norma Tecnica Uni 8813-1986)³⁹. Il sistema fu creato dall'artista Albert H. Munsell nel 1905 e rivisto nel 1943. A seconda delle caratteristiche della superficie da rilevare è possibile avvalersi di un atlante con campioni standard a finitura opaca o lucida e in tessere di diverse dimensioni; l'atlante non è idoneo per i colori fluorescenti.

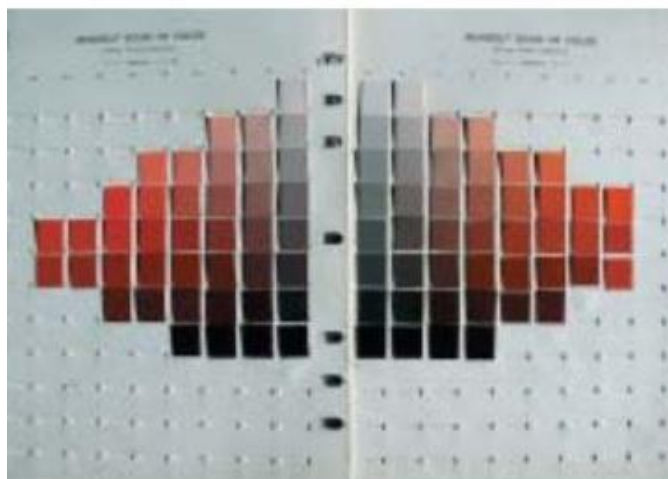


Figura 2.6. Esempio di due schede dell'atlante di Munsell, con tessere rimovibili.

L'idea di base nel sistema Munsell è la visualizzazione dei colori, secondo i propri attributi (chiarezza, chroma e tinta), come un albero ideale nello spazio tridimensionale: dove il fusto è

³⁸ Sharma G., Wu W., Dalal E.N., The CIEDE2000 Color-Difference Formula: Implementation Notes, Supplementary Test Data, and Mathematical Observations, Color Research & Application, 2004.

³⁹ <https://architettura.unige.it/sla/sezmat/pubblicazioni/vecchiattini.pdf>

costituito dalla chiarezza, mentre la chioma ha tanti rami quante sono le tinte, e la lunghezza di ogni ramo è legata alla saturazione (chroma) di ciascuna tinta (Figura 2.7).

La chiarezza assume valori da 0 (nero) a 10 (bianco), mentre le tinte sono suddivise in 10 sezioni ed ognuna di queste in altrettante 10 sezioni; 5 sono le tinte principali (R = Red, il rosso; Y = Yellow, il giallo; G = Green, il verde; B = Blue, il blu; P = Purple, il porpora) e 5 sono le tinte intermedie (YR = YellowRed, giallo-rosso; GY = Green-Yellow, verde-giallo; BG = Blue-Green, blu-verde; PB = Purple-Blue, porpora-blu; RP = Red-Purple, rosso-porpora). La distanza radiale dall'asse della chiarezza (il fusto dell'albero) indica il chroma e viene considerata solo a numeri pari (0-2-4-6-8-10-12-14-16) (Figura 2.8). L'atlante di Munsell è uno degli strumenti facilmente utilizzati nel settore dei beni culturali, ad esempio in architettura come in archeologia, per l'identificazione e la comunicazione delle colorazioni caratterizzanti le superfici in esame.

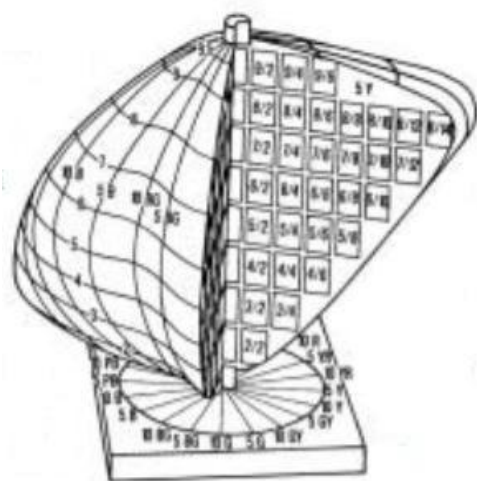


Figura 2.7. Albero dei colori ideato da Munsell.

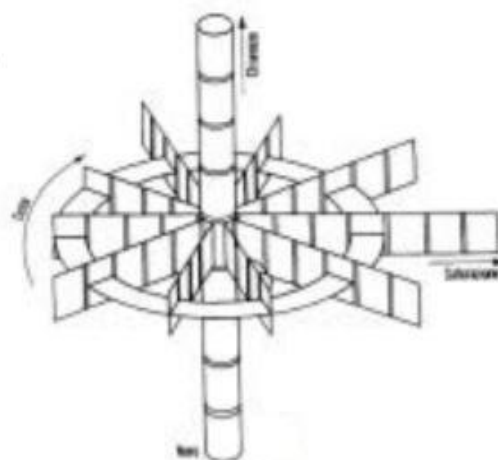


Figura 2.8. Schema di generazione dell'albero del colore.



Figura 2.9. Esempio di utilizzo dell'atlante di Munsell nell'identificare la colorazione di reperti individuati durante uno scavo archeologico.

Capitolo 3

Lo studio digitale del colore

L'espressione "studio del colore" di norma viene utilizzata per definire analisi svolte sul colore secondo modelli non usati, convenzionalmente, in ambito colorimetrico (Capitolo 2), bensì in altri settori, come ad esempio nel digitale. La necessità di visualizzare immagini colorate nel digitale ha indotto a definire nuovi spazi colore, profili cromatici che potessero visualizzare sul monitor i colori come sono percepiti dall'occhio umano. La notevole diffusione di immagini nel web, come l'evoluzione e l'agevolazione nello scattare foto digitali, non solo tramite macchine fotografiche ma anche cellulari, ha incentivato le diverse aziende nel fornire spazi colore sempre più fedeli e sofisticati, al fine di soddisfare le richieste più esigenti del pubblico, da quello più amatoriale a quello più professionale o d'élite.

3.1. International Color Consortium

L'International Color Consortium (ICC) è stato fondato nel 1993 da otto membri, tutte ditte di grande rilevanza mondiale: Adobe, Apple, Agfa, Microsoft, Kodak, Taligent (oggi IBM), Sun Microsystems (dal 2010 Oracle America, Inc.) e Silicon Graphics (l'azienda nel 2000 ha ceduto parte della sua linea alla Tera Computer Company). Obiettivo del consorzio è di promuovere ed incoraggiare la standardizzazione e l'evoluzione, a livello di sistema operativo e di multipiattaforma, di un sistema per la gestione digitale del colore. Il risultato è stato lo sviluppo di specifiche del profilo ICC, ad oggi riconosciute come Standard Internazionale, ISO 15076-1 (aggiornato nel 2010) ed ampiamente utilizzate e riconosciute in molti altre standard internazionali ISO riguardanti in particolar modo la gestione del colore nell'ambito della tecnologia grafica⁴⁰.

Il profilo ICC è un insieme di dati che descrive matematicamente come sono rappresentati i colori in una determinata periferica, quale ad esempio un monitor, una fotocamera, un cellulare o una stampante: ossia il profilo ICC descrive lo spazio colore/gli spazi colore utilizzato/i per identificare i colori della specifica periferica in questione, fornendo un sistema di gestione del colore con le informazioni necessarie per convertire i dati dallo spazio colore di una periferica di origine in uno spazio colore di riferimento standard (di solito è il sistema CIE XYZ). La specifica sul profilo ICC divide le periferiche (*devices*) in tre ampie classificazioni: *input devices*, *display devices* e *output devices*, e per ognuna di queste classi vi è una serie di modelli matematici che suggeriscono come passare da uno spazio all'altro. Tramite il profilo ICC è possibile riprodurre i dati sul colore da una periferica all'altra assicurando la fedeltà dei colori considerati; inoltre, ogni profilo fornisce tutte le informazioni necessarie per progettare un modulo di gestione del colore predefinito (CMM: Color Management Module o Method) per trasformare le informazioni sul colore tra spazi

⁴⁰ <http://www.color.org/abouticc.xalter>

colore della periferica natia⁴¹. Di norma i CMM sono già impostati in diversi sistemi operativi, come in Microsoft Windows: infatti tra le diverse specifiche illustrate in **Impostazione o Pannello di Controllo** è possibile individuare quale sia il profilo colore impostato nella propria periferica per visualizzare i colori (Figura 3.1).

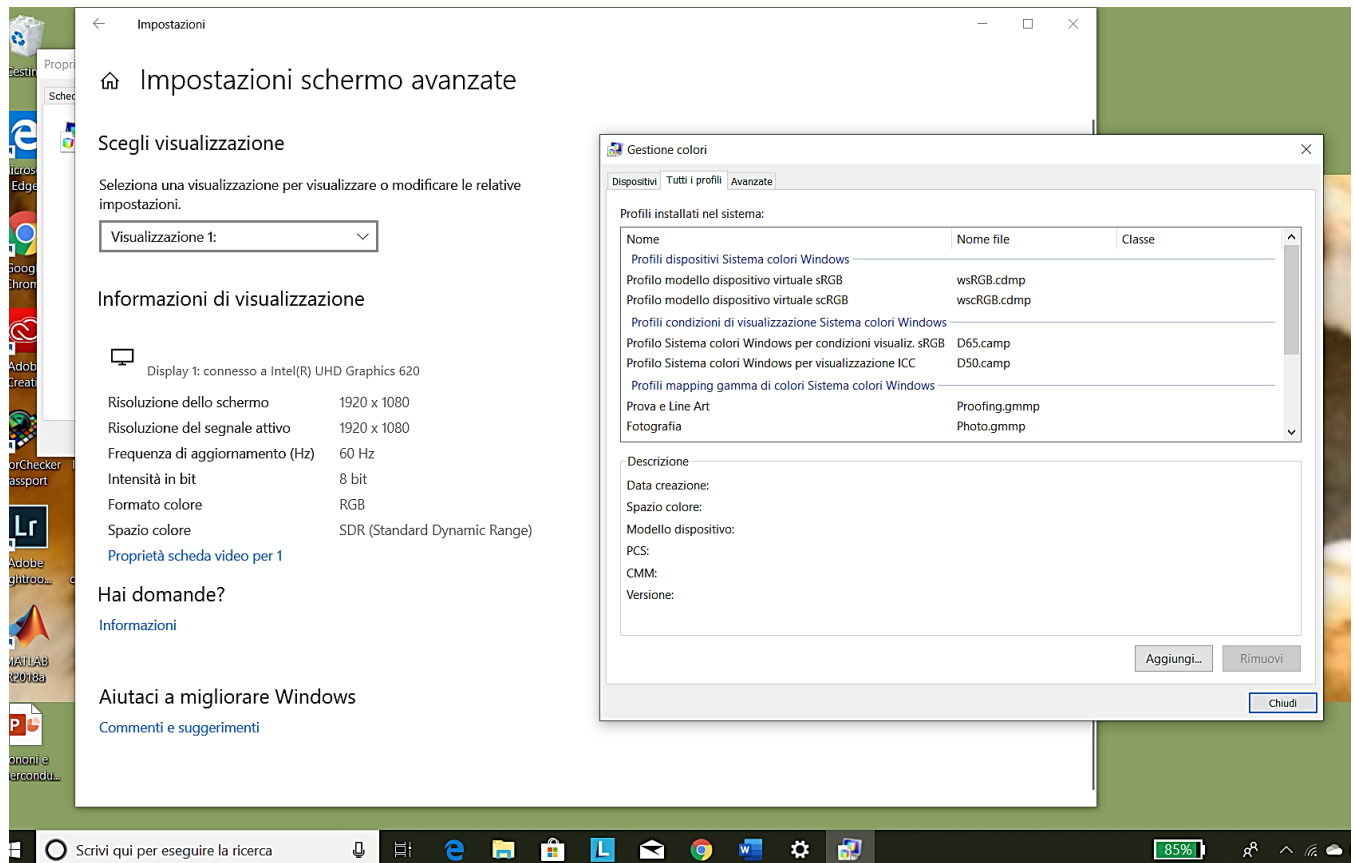


Figura 3.1. Visualizzazione del profilo ICC presente sul sistema operativo Windows sul mio portatile.

Tra le specifiche del profilo colore una delle più importanti, se non fondamentale, è lo “spazio di connessione tra profili” (*display device*, o meglio PCS) ossia il sistema di riferimento standard, perché questo è l’interfaccia comune tra il profilo colore dell’*input device* e il profilo colore dell’*output device*: quando si vuole visualizzare una foto sul monitor, il file fotografia ha incorporato il profilo colore impostato dall’azienda produttrice della macchina fotografica (profilo di *input device*) mentre la visualizzazione sul monitor può essere effettuata secondo il profilo colore incorporato su quel monitor (profilo di *output device*). Il PCS permette la comunicazione tra questi due profili, perché il profilo colore di *input device* è trasformato in PCS secondo le sue specifiche, dopodiché il PCS è convertito nel profilo colore di *output device* secondo le specifiche di quest’ultimo profilo. Queste due trasformazioni, quella d’*input* e quella d’*output*, proprio perché si basano sul PCS possono avvenire indipendentemente l’una dall’altra; allo stesso tempo, avendo il PCS la stessa definizione per tutti i profili colore ICC, queste trasformazioni possono essere accoppiate l’una con l’altra, per cui è possibile gestire il colore tra diverse periferiche perché tutti i

⁴¹ <http://www.color.org/profile.xalter>

profili hanno in comune il PCS e sono regolati dalle specifiche ICC. Nell'esempio di visualizzazione di una foto su un monitor di Figura 3.2, la foto è stata realizzata con una Panasonic (Lumix DMC-FZ200) e ha incorporato il profilo colore definito dalla ditta stessa (AdobeRGB_1998); quando viene visualizzata sul monitor avviene prima la trasformazione d'*input*, per cui il profilo colore della foto si converte nel PCS, e poi la trasformazione d'*output*, per cui dal PCS viene trasformata nel profilo impostato nel monitor (di norma sRGB IEC 61966-2.1).

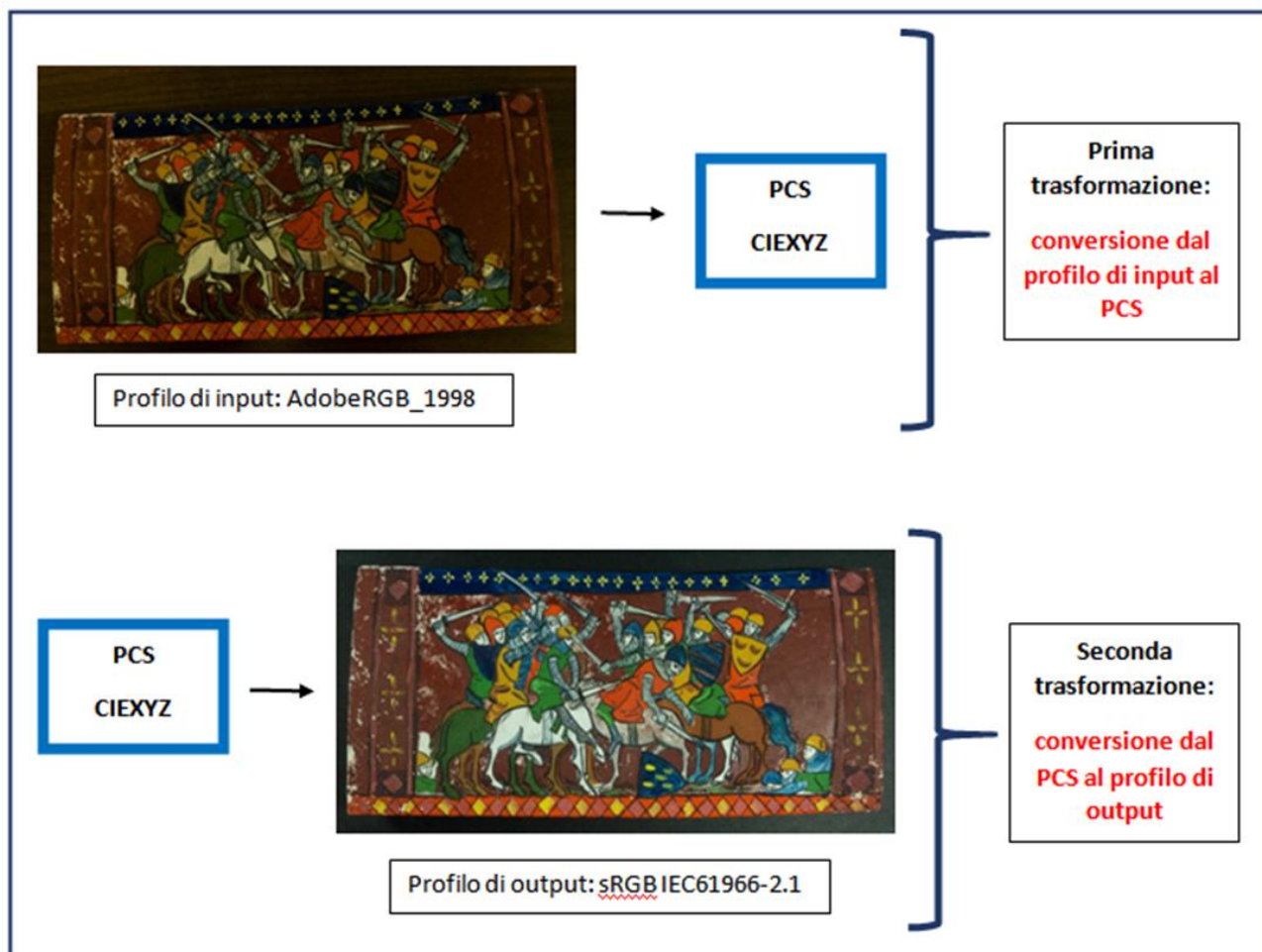


Figura 3.2. Schematizzazione delle due trasformazioni che permettono il passaggio di immagini digitali tra diverse periferiche.

Il PCS è, precisamente, il sistema di riferimento CIEXYZ: *a)* osservatore standard CIE 1931, cioè 2° (quindi visione foveale), *b)* illuminante D50, quindi un illuminante che simula la luce solare a 5000 K *c)* geometria d'illuminazione 0°/45°, cioè con gli illuminanti posti a 45° rispetto al piano su cui è posto il campione mentre i raggi riflessi dal campione sono rilevati lungo la normale a tale piano (ISO 13655 standard, "Graphic technology-Spectral measurement and colorimetric computation for graphic arts images").

L'intero spettro di colori che possono essere rappresentati su una periferica (ad es. una stampante) è denominato *gamut*, ma questo non è abbastanza ampio da riprodurre tutti i colori appartenenti alla gamma cromatica del PCS. In pratica, quando un colore cade al di fuori del *gamut* dello spazio di stampa (il totale dei colori che possono essere riprodotti dalla stampante) si

dice che quel colore è stato tagliato (*clipped*); significa che quel colore non verrà riprodotto in uscita e, se i colori tagliati sono molti, allora la stampa mancherà di sfumature. Per ovviare a questa “perdita”, l’ICC ha definito quattro modi per mappare i diversi *gamut*, soprannominati “*intenti di rendering*”. Gli intenti di *rendering*, cioè del modo di riprodurre, ci forniscono dei metodi per rappresentare dei colori che altrimenti sarebbero lasciati fuori dallo spazio colore di stampa. Dobbiamo tenere presente che il cervello umano è migliore nel valutare i rapporti tra i colori che non il loro valore assoluto, per cui, se il rapporto tra i colori rimane costante, l’immagine finale sembrerà molto simile all’originale e non ci renderemo conto di cosa si è perso.

Gli intenti di rendering dicono al sistema in che modo gestire le relazioni tra i colori. I quattro intenti principali sono:

1. Absolute Colorimetric (Colorimetrico Assoluto)
2. Relative Colorimetric (Colorimetrico Relativo)
3. Saturation (Saturazione)
4. Perceptual (Percettivo)

Gli intenti di *rendering* colorimetrici preservano la relazione tra i colori del gamut più ridotto (*in-gamut*) a discapito di quelli *extra gamut* (*out-gamut*); la mappatura dei colori *extra gamut* non è specificata ma deve essere coerente con lo scopo della trasformazione. Inoltre, va osservato che, nelle trasformazioni secondo gli intenti colorimetrici, i valori del PCS in una trasformazione sono interpretati secondo la colorimetria del profilo d’input o d’output, indipendentemente che questa sia la colorimetria effettiva, quella cioè effettuata semplicemente tramite solo misure spettrofotometriche ed utilizzata, ad esempio, in diagnostica od in altri settori scientifici.

Gli intenti colorimetrici relativi bilanciano i valori del tristimolo dell’*in-gamut* in maniera che il bianco del profilo della periferica (sia input che output) sia mappato sul bianco del sistema di riferimento PCS. Con l’applicazione di questo compromesso i valori del PCS sono misurazioni relative del dato originale acquisito (per un profilo d’input) o la riproduzione cromatica relativa prodotta dalla periferica d’output (per un profilo d’output) (Figura 3.3).



Figura 3.3. Esempio di adattamento tramite intento colorimetrico relativo applicato alla visualizzazione su schermo (spazio colore sRGB) di una foto di un giornale cartaceo.

Gli intenti colorimetrici assoluti, invece, non regolano i valori del tristimolo dell'*in-gamut*, ma rimangono invariati. I valori del PCS rappresentano le misure dei dati originali acquisiti in riferimento alla riflettanza di un ipotetico diffusore ideale (per i profili d'input) o le riproduzioni di colore prodotte dalla periferica d'output rispetto alla riflettanza di un ipotetico diffusore ideale (per i profili d'output).

Gli intenti di saturazione mappano (o bilanciano) il *gamut* secondo le specifiche dell'azienda produttrice: principalmente l'intento è quello di preservare la vivacità dei colori puri, ossia la loro purezza di colore (chroma). E' utile per le immagini che contengono oggetti quali diagrammi o grafici.

Gli intenti percettivi, come il precedente, mappano il *gamut* in base alle specifiche del fornitore: lo scopo, in questo caso, è di preservare le tonalità dello spettro di colori presenti. E' utile per la riproduzione d'immagini, quali le fotografie. Un profilo che consente l'intento di *rendering* percettivo e che non considera una qualche periferica, per essere generato, ha bisogno di rappresentare il colore secondo un desiderato apparire. Questo obiettivo viene concretizzato ipotizzando un medium di riferimento (*reference medium*): una periferica di riferimento sulla quale sono visualizzati i colori secondo la parvenza desiderata. Il medium di riferimento deve avere delle specifiche tali che, sebbene sia ipotetico, possa essere trattato come se fosse reale; inoltre deve essere visualizzato in uno specifico ambiente di riferimento (*reference viewing environment*). Il concetto di medium di riferimento è utile al progettista per comprendere come realizzare l'apparire desiderato del colore nel PCS. Di norma il medium di riferimento è una stampa ipotetica su un substrato avente una riflettanza dell'89% (bianco di riferimento) mentre il colore stampabile più scuro ha una riflettanza del 0,30911%. Questi sono i punti del bianco e del nero del medium di riferimento, e sulla base di queste specifiche è possibile definire il suo *gamut*. I valori PCS, in un adattamento di *rendering* percettivo, rappresentano le misure delle riproduzioni di colori sull'ipotetica stampa, visualizzata nell'ambiente di riferimento, viste da un osservatore umano che si è adattato all'illuminamento in questo ambiente.

Gli intenti non colorimetrici, come gli ultimi due descritti, sono a discrezione del fornitore per cui è poco probabile che profili prodotti da differenti aziende forniscano lo stesso risultato. Gli utenti devono essere a conoscenza di questo aspetto per garantire un minimo di coerenza del proprio flusso di lavoro quando questa è richiesta. Al momento ICC non ha fornito alcune specifiche su come comportarsi ma sta ancora analizzando il problema per trovarvi un'adeguata soluzione^{42,43}.

Gli intenti non colorimetrici sono molto utili quando si vuole visualizzare immagini i cui colori sono sia *in-gamut* che *out-gamut*, perché tutte le colorazioni vengono bilanciate; tuttavia bisogna porre attenzione alla scarsa affidabilità nelle riproduzioni dei colori perché ogni fornitore gestisce il colore secondo il proprio adattamento di *rendering* non colorimetrico.

Gli intenti colorimetrici, invece, risultano fedeli nella riproduzione del colore perché si basano sulle loro colorimetrie, rispettivamente la colorimetria d'input e di output (da notare che queste colorimetrie non necessariamente corrispondono a quella effettiva, svolta semplicemente

⁴² <http://www.color.org/profile.xalter>

⁴³ <http://www.boscarol.com/blog/?tag=intento&paged=2>

con un colorimetro). Lo svantaggio più evidente è che questi *intenti* si applicano solo sui colori dell'*in-gamut*, mentre causano delle discontinuità o posterizzazioni nelle immagini digitali dove i colori appartengono all'*out-gamut* (Figura 3.4).

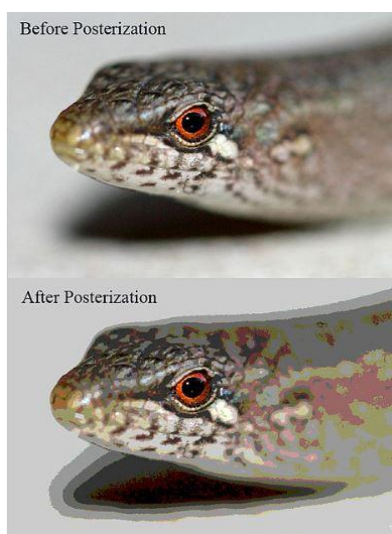


Figura 3.4. Posterizzazione di una foto: l'immagine posterizzata presenta delle discontinuità cromatiche dovute ad una diminuzione dei livelli di colore.

3.2. Gli spazi colore nel digitale: Adobe RGB-1998 e sRGB

Come in colorimetria anche nel digitale esistono gli spazi colore ossia un modello matematico che rappresenta i colori con relativa funzione di mappatura, di solito con almeno tre coordinate: ognuno di questi spazi colore è descritto da un proprio e distinto *gamut*, tutti comunque sottoinsiemi dei possibili colori rappresentabili nel sistema di riferimento CIEXYZ, osservatore standard 1931 (cioè 2°, osservazione foveale).

Gli spazi colore in uso ad oggi per le variegate periferiche sono molteplici e ognuno di loro principalmente si fonda su modelli colore a sintesi sottrattiva oppure additiva. In Figura 3.5 è mostrato il *gamut* del modello CMYK, a sintesi sottrattiva, ampiamente utilizzato per le periferiche quali le stampanti a colori, e il *gamut* di due spazi colore che si basano sul modello a sintesi additiva RGB: lo spazio AdobeRGB-1998 e lo spazio sRGB, entrambi spazi ottenuti mediante trasformazioni non lineari dai corrispettivi valori R, G e B.

L'Adobe RGB-1998 è stato creato dalla Adobe Systems nel 1998 al fine di fornire uno spazio colore di lavoro, non strettamente connesso con una periferica specifica, ma che rappresenta le condizioni ideali per la riproduzione dell'immagine a colori. L'Adobe RGB-1998 è stato ampiamente utilizzato in molti settori sia perché fornisce un ampio e bilanciato *gamut* di colori, che può essere riproposto e sfruttato in una grande varietà di periferiche, sia perché è incluso in tutte le versioni dei software per la gestione del colore forniti dall'Adobe Systems, come ad esempio Photoshop Lightroom, uno dei software più ampiamente utilizzati nel settore fotografico amatoriale e professionale⁴⁴.

⁴⁴ <https://www.adobe.com/digitalimag/adobergb.html>

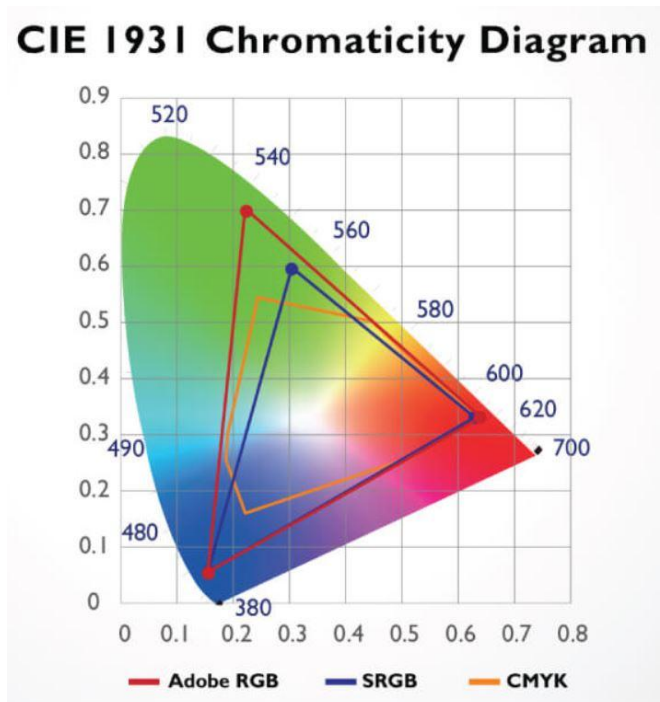


Figura 3.5. Visualizzazione di gamut di diversi spazi colore, posti a confronto con la gamma di colori visibile dall'essere umano secondo il sistema di riferimento CIEXYZ 1931.

Le specifiche riguardanti il profilo colore sono riscontrabili sul sito dell'ICC⁴⁵, così come sul sito dell'Adobe. Nel dettaglio⁴⁶:

- le coordinate cromatiche delle componenti primarie dello spazio RGB sono ($z=1-x-y$):

Rosso (R)	$x = 0,6400$	$y = 0,3300$
Verde (G)	$x = 0,2100$	$y = 0,7100$
Blu (B)	$x = 0,1500$	$y = 0,0600$
Bianco di Riferimento (D65)	$x = 0,3127$	$y = 0,3290$

- $$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,04159 & -0,56501 & -0,34473 \\ -0,96924 & 1,87597 & 0,04156 \\ 0,01344 & -0,11836 & 1,01517 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$
dove X, Y, Z sono state normalizzate

- $$R' = \frac{1}{R^{2,19921875}} \quad G' = \frac{1}{G^{2,19921875}} \quad B' = \frac{1}{B^{2,19921875}} \quad (\text{trasformazione di non linearità o correzione gamma})^{47}$$

dove R' , G' , B' sono i valori delle coordinate descriventi il colore nello spazio AdobeRGB-1998; ovviamente se queste sono codificate a 8-bit, allora sono necessarie ulteriori modifiche matematiche.

⁴⁵ <http://www.color.org/chardata/rgb/adobergb.xalter>

⁴⁶ Adobe, Adobe®RGB (1998) Color Image Encoding, Versione maggio 2005.

⁴⁷ Quando si scatta una foto, la macchina fotografica registra l'intensità luminosa e la elabora non linearmente rispetto a quella reale: l'intensità luminosa è, cioè, aumentata di un "fattore gamma". Quindi, i colori di una foto digitale sono corretti modificando i canali R, G, B tramite la radice avente come indice il fattore gamma.

Un altro degli spazi colore utilizzati, sebbene presenti un *gamut* minore rispetto a quello dell'AdobeRGB-1998, è l'sRGB (Standard RGB). Questo spazio è stato realizzato nel 1996 dalle aziende Hewlett-Packard(HP) e Microsoft con lo scopo di fornire uno spazio standardizzato in comune per i diversi sistemi operativi, driver e ambiente Internet, in maniera da utilizzare la stessa definizione di colore e di alleggerire, così, il carico di informazioni (ossia il profilo colore) contenute in un file quando passa da una periferica all'altra⁴⁸. Nell'aprile del 1990 l'sRGB è stato definito con un accordo unanime a livello mondiale come spazio RGB non lineare calibrato per l'alta definizione (HDTV) e lo scambio di programmi: Rec.ITU-RBT.709, cioè le raccomandazioni che definiscono gli standard di acquisizione e trasferimento di un segnale HDTV⁴⁹. L'utilizzo di profili colore incorporati con relative specifiche ICC per passare nel PCS e permettere, quindi, di convertire il colore dallo spazio d'input a quello d'output consente una buona accuratezza del colore ma risulta molto macchinoso e non tutti gli utenti sono interessati a seguire queste direttive. Secondo Lars Borg, uno dei principali scienziati ed ingegneri del colore nel digitale presso l'Adobe System, ci sono tre livelli di persone⁵⁰:

1. persone che non sanno nulla sulla gestione del colore, che non vogliono saperne nulla e vogliono sistemi facili e sbrigativi per gestire il colore nei diversi dispositivi;
2. persone, un gruppo più ristretto, che comprano l'attrezzatura per gestire il colore ma non conoscono approfonditamente il loro funzionamento;
3. persone, una elite, che sono interessate alla gestione del colore, hanno le attrezzature e le adeguate competenze/conoscenze.

Lo spazio standardizzato sRGB è appositamente creato per le persone descritte nel primo gruppo; se i sistemi operativi delle periferiche utilizzate, così come internet, una delle più consistenti fonti d'immagini a colori, usano il solito spazio colore non è necessario che i file abbiano incorporato un proprio profilo colore, il sistema operativo lo trasformerà direttamente nello spazio sRGB, facilitando, alleggerendo e velocizzando il flusso di lavoro da periferica all'altra.

TABLE : sRGB viewing environment Parameters	
Condition	sRGB
Luminance level	80 cd/m ²
Illuminant White	$x = 0.3127, y = 0.3291$ (D65)
Image surround	20% reflectance
Encoding Ambient Illuminance Level	64 lux
Encoding Ambient White Point	$x = 0.3457, y = 0.3585$ (D50)
Encoding Viewing Flare	1.0%
Typical Ambient Illuminance Level	200 lux
Typical Ambient White Point	$x = 0.3457, y = 0.3585$ (D50)
Typical Viewing Flare	5.0%

Tabella 3.1. Parametri riguardante l'ambiente di riferimento per la definizione dello spazio sRGB.

⁴⁸ <https://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB>

⁴⁹ <https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.709-6-201506-I/en>

⁵⁰ https://www.iec.ch/colourmanagement/colour_reproduction/

Riprendendo quanto sopra descritto per gli adattamenti di *rendering* percettivi (paragrafo 3.1), l'sRGB è uno spazio standardizzato che definisce l'apparenza desiderata del colore su un display standard o di riferimento secondo le specifiche ITU-R BT.709 in una determinata condizione di visione di riferimento (*reference viewing environment*), condizione che ricorda l'illuminazione standard in un ufficio con un monitor che emana una luce fioca (Tabella 3.1).

“Encoding Ambient” è l'ambiente di riferimento consigliato per la visualizzazione di immagini fotografiche sul monitor (ISO/IEC JTG 1/SC 29 N3336)⁵¹ mentre “Typical Ambient” si riferisce alle tipiche condizioni di illuminazione quando si utilizza un computer in ufficio o a casa.

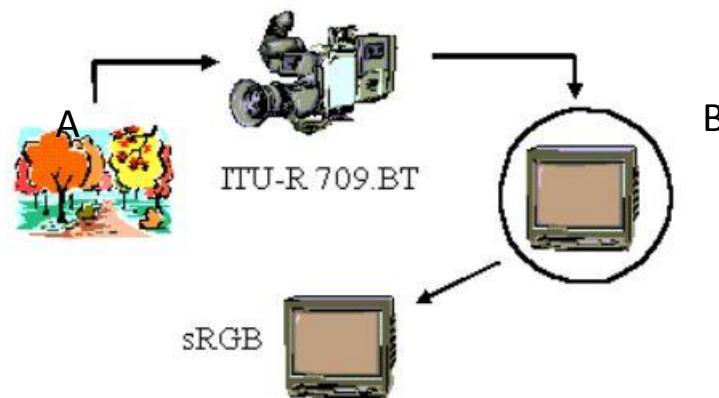


Figura 3.6. Schematizzazione della codifica sRGB.

In Figura 3.6 è rappresentato lo schema che definisce le condizioni e specifiche sRGB: questo spazio fornisce le codifiche necessarie affinché i valori del tristimolo B del monitor standard, secondo le specifiche ITU- RBT.709, siano prossimi ai valori del tristimolo A della scena originale.

Matematicamente lo spazio sRGB è così espresso:

- le coordinate cromatiche delle componenti primarie dello spazio RGB sono ($z=1-x-y$):

Rosso (R)	$x = 0,6400$	$y = 0,3300$	$z = 0,030$
Verde (G)	$x = 0,3000$	$y = 0,6000$	$z = 0,1000$
Blu (B)	$x = 0,1500$	$y = 0,0600$	$z = 0,7900$
Bianco di Riferimento (D65)	$x = 0,3127$	$y = 0,3290$	$z = 0,3583$

- $$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,2410 & -1,5374 & -0,4986 \\ -0,9692 & 1,8760 & 0,0416 \\ 0,0556 & -0,2040 & 1,0570 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

- trasformazione di non linearità o correzione gamma:

$$R', G', B' \leq 0,00304$$

⁵¹ <https://www.itscj.ipsj.or.jp/sc29/open/29view/29n3336c.htm>

$$R_{sRGB} = 12,92 \times R'$$

$$G_{sRGB} = 12,92 \times G'$$

$$B_{sRGB} = 12,92 \times B'$$

altrimenti:

$$R_{sRGB} = 1,055 \times R'^{(1/2.4)} - 0,055$$

$$G_{sRGB} = 1,055 \times G'^{(1/2.4)} - 0,055$$

$$B_{sRGB} = 1,055 \times B'^{(1/2.4)} - 0,055$$

- Codifica in 8 bit:

$$R_{sRGB-8bit} = 12,92 \times R_{sRGB}$$

$$G_{sRGB-8bit} = 12,92 \times G_{sRGB}$$

$$B_{sRGB-8bit} = 12,92 \times B_{sRGB}$$

Esistono diverse versioni dello spazio sRGB a seconda dell'estensione del gamut: lo sviluppo tecnologico ha portato a definire e poter visualizzare un gamut molto esteso e quindi sono state codificate nuove versioni per aggiornare lo spazio sRGB, tramite opportune trasformazioni è possibile passare da queste versioni più aggiornate a quella meno recente⁵².

Di norma le immagini sul web sono conformi allo spazio sRGB, i sistemi operativi Microsoft Windows sono conformi allo spazio colore sRGB, i profili colori impostati nelle macchine fotografiche, di solito, sono o AdobeRGB-1998 o sRGB, come si evince lo spazio RGB standard è quello maggiormente utilizzato, come suggerito e definito nel progetto stesso della sua realizzazione, per questo in questo progetto lo spazio colore digitale considerato è l'sRGB, nello specifico la versione IEC 61966-2-1:1999.

Sebbene esista un'istituzione come l'ICC e la creazione e l'utilizzo di spazi colore nel digitale, purtroppo i colori visti da periferica a periferica, per quanto qualitativamente validi e soddisfacenti, presentano delle piccole divergenze e soprattutto non riproducono necessariamente i colori secondo i dati quantitativi della colorimetria effettiva. Le infinite variabili presenti nel momento in cui si acquisiscono immagini della realtà, ad esempio una fotografia o una ripresa video, molto spesso non sono in linea con le condizioni CIE necessarie per misurare il colore; inoltre ogni periferica, per quanto possa essere standard nelle sue specifiche, presenta sempre delle discordanze, che rendono il passaggio dei dati sul colore da una periferica all'altra approssimativo e questo impedisce di usare questi come valida alternativa a dati acquisiti con il colorimetro.

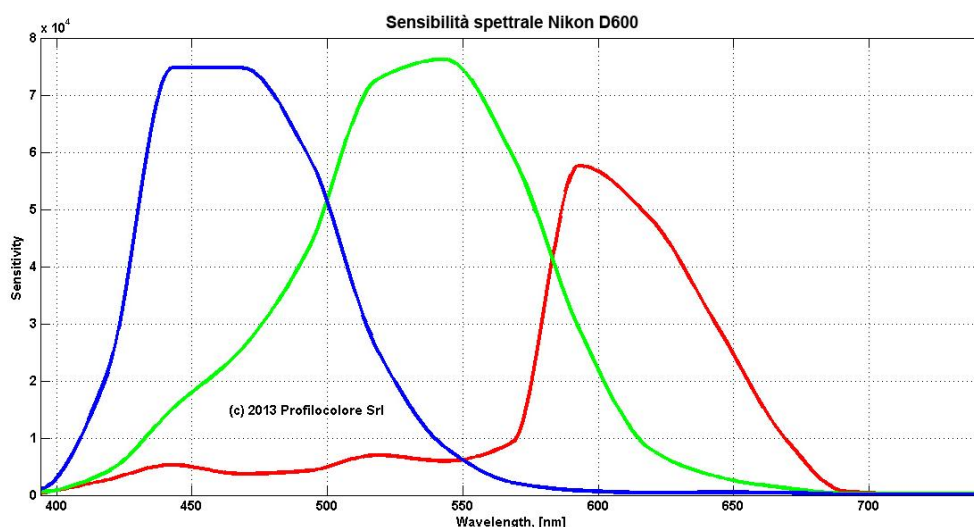
In colorimetria quando vengono effettuate delle misure sul colore si seguono precise indicazioni sulla geometria d'illuminazione, sull'illuminante da usare e lo strumento è realizzato in maniera da seguire queste regole e nel risultare fedele e ripetibile nelle misurazioni in maniera che i dati acquisiti non siano relativi e circoscritti sia allo strumento usato che al momento di misurazione. I dati inoltre vengono riportati nello specifico spazio CIE corrispondente all'illuminante utilizzato e con specifico osservatore standard. Quando si scattano delle foto invece, non

⁵² <http://www.color.org/srgbprofiles.xalter#v4app>

necessariamente viene presa in considerazione la geometria d'illuminazione o il tipo di illuminazione; inoltre, a seconda delle specifiche delle fotocamera, non tutte permettono di scattare foto con campo visivo pari a quello di un osservatore standard 2°, quindi è molto probabile che l'illuminante o l'osservatore standard dei dati sul colore non siano in linea con i parametri che definiscono lo spazio colore digitale o il PCS nel quale verranno convertiti. Ovviamente questo causa una notevole approssimazione tra i dati colorimetrici della periferica e quelli effettivi, inoltre un altro aspetto molto importante è lo strumento d'acquisizione: il colorimetro come già scritto è stato realizzato con l'obiettivo di compiere misurazioni di alta affidabilità, ripetibilità, ridottissima approssimazione affinché non vi sia alcuna forma di dipendenza tra misure acquisite da uno strumento colorimetrico o l'altro, dall'altra parte, invece, una macchina fotografica non è realizzata con questi obiettivi, vi è un fotosensore che trasforma la luce che incide su esso in carica elettrica, e questa, a sua volta, verrà elaborata in segnale digitale sull'immagine, ma ha una funzionalità non strettamente scientifica colorimetrica, lo scopo di una fotocamera è scattare foto che sia qualitativamente apprezzabili, non quantitativamente corrette, inoltre proprio perché l'obiettivo è la resa qualitativa la macchina fotografica non garantisce la stessa ripetibilità ed universalità come un colorimetro, due macchine fotografiche della solita marca e solito modello possono dare rese diverse sul colore nonostante siano state utilizzate per scattare foto sullo stesso oggetto con la stessa geometria ottica, osservatore standard ed illuminazione. Pertanto, su una stessa periferica d'output, come un monitor, le foto delle rispettive macchine fotografiche forniranno informazioni diverse sul colore dello stesso oggetto visualizzato; per questo motivo l'ICC parla di colorimetria d'input (o d'output) piuttosto che colorimetria effettiva quando definisce i propri intenti di *rendering* colorimetrici:

i fotosensori che caratterizzano la propria fotocamera hanno una curva di sensibilità spettrale diversa da quella dell'occhio umano quindi la colorimetria CIE fornita dai fotosensori della fotocamera è diversa dalla colorimetria CIE effettiva (Figura 3.7).

Questi fattori, ovviamente, impediscono di utilizzare le foto per acquisire dati sul colore ed utilizzarli al pari di qualunque misurazione acquisita con un colorimetro o con uno spettrofotometro di riflettanza (cf. Capitolo 4 ed il glossario per la differenza tra le due tipologie di strumentazione).



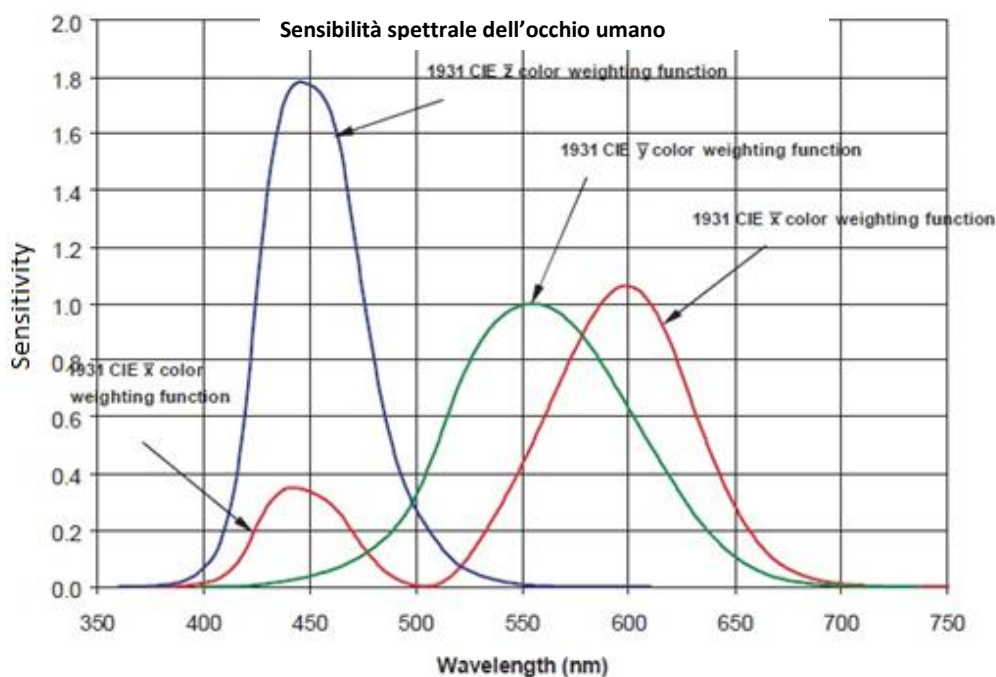


Figura 3.7. Curve di sensibilità spettrale rispettivamente: in alto del fotosensore che caratterizza la macchina fotografica della Nikon D600 ed in basso quella dell'occhio umano.

3.3. Caso di studio digitale del colore: le formelle dei “Misteri del Rosario” di Chiusanico (IM)

Questo studio costituisce parte della ricerca del primo anno di dottorato, quando ancora l'attenzione non si era focalizzata sulla *caratterizzazione* della macchina fotografica come metodo di standardizzazione dello studio della colorimetria nel digitale.

Come già accennato nella parte introduttiva del presente progetto di dottorato, le formelle dei “Misteri del Rosario” della Chiesa di Santo Stefano di Chiusanico (IM) hanno rappresentato un caso di recupero piuttosto complesso, dovuto alla fragilità intrinseca del materiale stesso; il relativo progetto di conservazione e restauro, dal titolo “Tecniche innovative per la Diagnostica ed il Restauro di opere policrome su supporto metallico appartenenti al patrimonio storico-artistico e culturale della Liguria” del Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale dell'Università di Genova aveva ottenuto un finanziamento del Fondo Sociale Europeo (FSE).

Le 15 formelle (Figura 3.8) sono policromie ad olio, su latta: 10 ovali irregolari di cm 17 x 19,5 e 5 mistilinei di sviluppo orizzontale di cm 17 x 33. Le formelle erano inserite, come cornice della scultura della Madonna del Rosario, nell'apparato marmoreo parietale dell'altare, a sinistra della Chiesa, e sono state smontate negli anni precedenti su segnalazione del funzionario del MIBACT a seguito dei lavori di recupero dell'edificio.

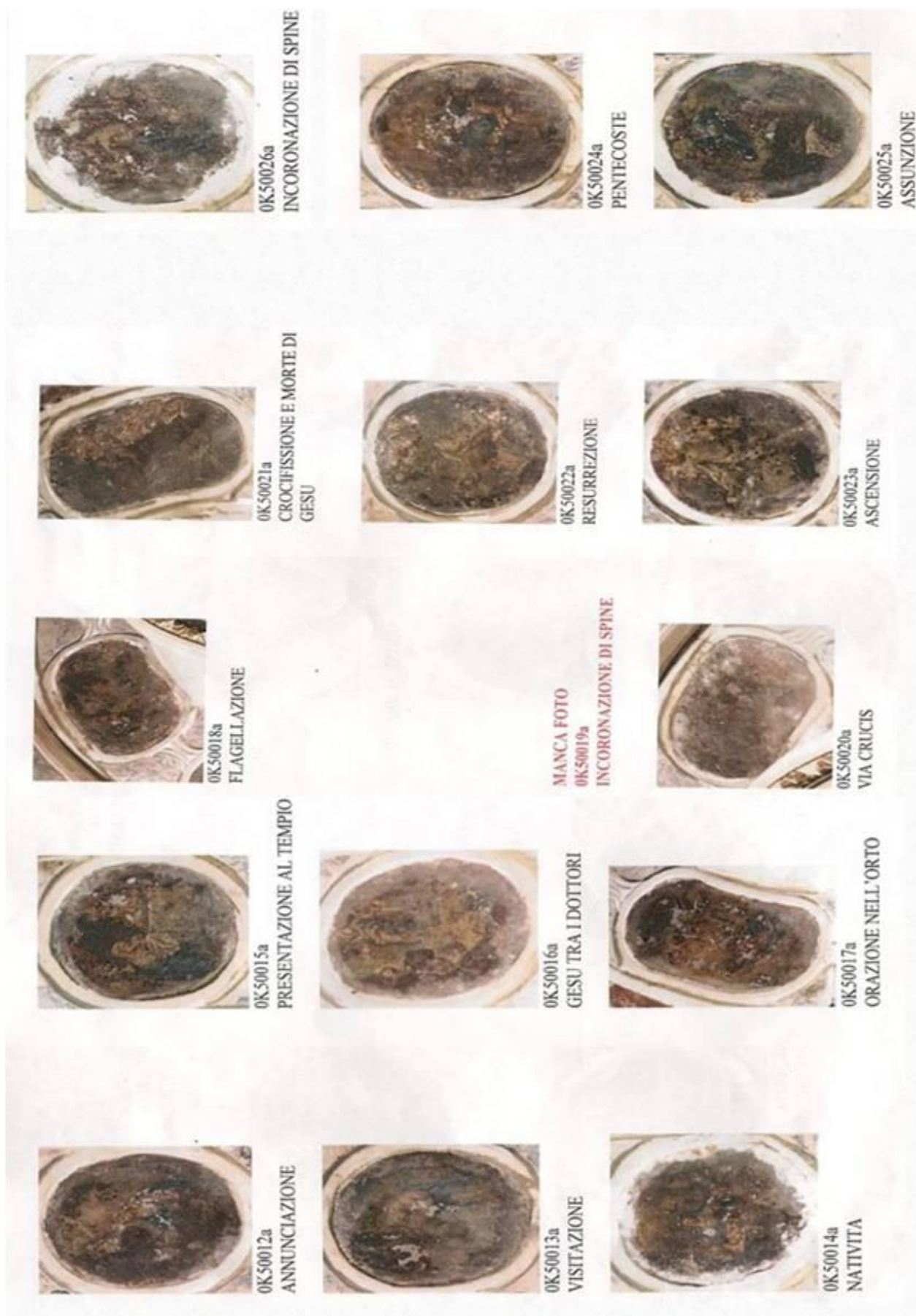


Figura 3.8. 14 delle 15 formelle de "I Misteri del Rosario" di Chiusanico prima dell'intervento di restauro.

Le formelle erano in un avanzato stato di degrado (la Figura 3.9 evidenzia, come esempio, lo stato della formella 50014 – La Natività – prima dell'intervento): gravi ossidazioni del supporto metallico debordanti sulla policromia, ormai quasi illeggibile, fori, lacerazioni, perdita di materiale pittorico, indebolimento delle lastre in latta con deformazioni ben evidenti. La degradazione, innescatosi sulle formelle a seguito delle infiltrazioni d'acqua nell'edificio ecclesiastico e del microclima presente, aveva continuato a procedere anche dopo la rimozione delle formelle dalla parete, anche perché le formelle non vennero immediatamente risanate. Sulla pellicola pittorica erano presenti scialbi, cere, resine e vernici mescolati tra loro e i vari livelli di ossidazione, le lacune più recenti mostravano a vista le latta ed in alcuni punti era visibile una vernice simile alla mecca. Nelle lacune si era formato, in prevalenza, uno strato di ossido di stagno, irreversibile ma almeno stabile.

L'intervento di restauro compiuto sulle formelle rappresenta il primo caso di pulitura a laser di policromie su latta. I diversi strati di corrosione sono stati rimossi mediante l'ausilio di opportuni laser ad opera della dottoressa Anna Brunetto, e l'utilizzo del laser alternato alle azioni di pulitura meccanica e chimica (utilizzo di opportuni solventi) della restauratrice Roberta Moggia ha sanato le formelle rendendo le policromie decisamente più leggibili (cf. Figure 3.9 e 3.10)⁵³. Durante il restauro sono stati svolti degli studi preliminari tramite la fluorescenza a raggi X (XRF) e la diffrazione a raggi X (XRD) per identificare i pigmenti e vari elementi inquinanti presenti sulle formelle; a restauro terminato, invece, per valutare complessivamente la qualità del lavoro di pulitura è stata svolta un'analisi sul colore.



Figura 3.9. *Policromia su latta rappresentante "La Natività" prima dell'intervento di restauro.*

⁵³ Moggia R., Brunetto A., Franceschi E., Manfredi E., Manfrinetti P., Petrillo G., Dellepiane S., Sista A., *Combinazioni di laser e solvent-gel sulle formelle policrome ad olio su lamina metallica dei Misteri del Rosario di Chiusanico*, Conference Book of APLAR 6, applicazioni laser nel restauro, 14th-15th September 2017, Florence.

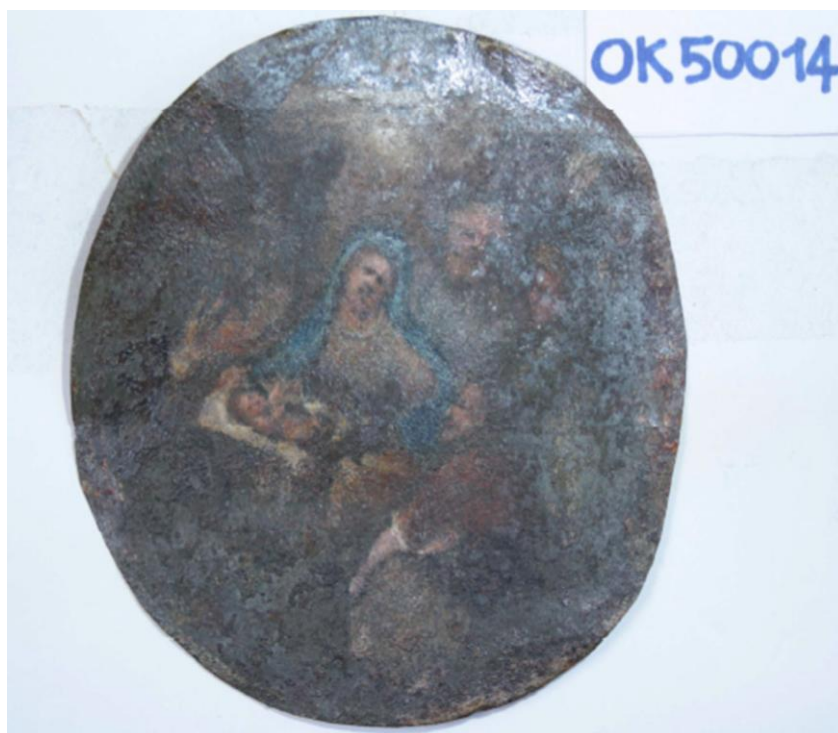


Figura 3.10. *Policromia "La Natività" dopo il restauro e i ritocchi della restauratrice.*

Purtroppo, non avendo partecipato al progetto di restauro delle formelle fin dalle fasi iniziali, non è stato possibile acquisire dati mediante il colorimetro sui pigmenti costituenti la policromia. L'unica documentazione presente era costituita dalle foto scattate dalla restauratrice prima del restauro, dopo la pulitura del laser e prima degli ultimi ritocchi compiuti dalla restauratrice stessa: ritocchi ovviamente realizzati nel rispetto del valore intrinseco nel bene ecclesiastico. Si è pertanto deciso di svolgere uno studio del colore su queste serie di foto tenendo in considerazione che non è stata rispettata alcuna indicazione CIE per lo studio colorimetrico, infatti le foto sono state scattate dalla restauratrice ponendo l'apparecchio fotografico perpendicolare al piano d'appoggio dove erano posizionate le formelle, lo sfondo sul quale poggiano le formelle sono fogli bianchi e non un grigio tendente al nero come previsto dalla CIE, il tipo d'illuminazione utilizzato è la lampadina posta per illuminare lo studio della restauratrice, lampadina ad incandescenza di circa 4000/5000 K. Le foto sono state scattate senza alcun riferimento cromatico o scala colore della Kodak o della X-Rite, ausili realizzati appositamente per la definizione del colore in fotografia, inoltre le foto del "prima" presentano una quadratura leggermente diversa dalle foto del "dopo pulitura laser".

Il lavoro sul colore è stato svolto tenendo sempre in considerazione che si tratta di analisi relative e specifiche per l'operazione di restauro in esame; le distorsioni geometriche legate a differenti inquadrature tra la serie di foto del "prima restauro" e quella del "dopo pulitura laser" sono state corrette manualmente.

Un'immagine digitale è costituita da un insieme di pixel disposti spazialmente secondo la geometria della realtà che si riproduce, pertanto nel correggere le diverse inquadrature, tra la serie di foto del "prima restauro" e del "dopo pulitura laser", sono state valutate tutte le possibili traslazioni o rotazioni presenti in ogni coppia di foto corrispondente alla medesima raffigurazione nelle due serie di foto, e poi corrette. Questa operazione è stata svolta manualmente considerando

dei pixel di riferimento in ogni foto della serie del “prima restauro” e i corrispettivi pixel nella foto del “dopo pulitura laser”; individuate le operazioni di simmetria coinvolte e le relazioni matematiche, le correzioni sono state effettuate mediante appositi programmi scritti su Matlab. Ovviamente, per comprendere se l’azione del laser avesse in qualche modo alterato il colore della policromia è stato necessario lavorare sull’analisi quantitativa del colore di aree identiche di foto selezionate tra le due serie scattate prima e dopo l’intervento.

Considerando tutti i limiti legati a come erano state scattate le foto si è preferito lavorare nello spazio di colore impostato nel sistema operativo (Microsoft Windows) del computer, ossia lo spazio sRGB; tutte le immagini digitali sulle quali si è lavorato erano in formato TIFF 8bit, e le informazioni “quantitative” sul colore sono state acquisite mediante programmi scritti su Matlab.

Operativamente, per ognuna delle seguenti cromie (classi di colore):

- **il bianco**: in realtà, una tonalità generalmente tendente ad un grigio-biancastro con una componente giallastra
- **il rosso**, distinguendo quello della veste di Gesù da altri “rossi”
- **il celeste/blu**, differenziando tra il colore del mantello della Vergine e altri “blu”
- **il marrone**, distinto in marrone della tunica maschile, marrone dei capelli della Vergine e quello dei capelli di Gesù
- **il giallo**: distinguendo tra giallo delle aureole e giallo dei capelli biondi
- **il rosa** dell’incarnato dei personaggi religiosi
- una sorta di **ocra**, relativo al telo della Vergine
- **una miscela tra marroncino-rosa** definito come colore della veste della Vergine
- **il colore metallico** della latta.

sono state selezionate, per ogni formella, finestre (*aree o ritagli*) di 6x6 pixel sulle foto scattate prima e dopo l’intervento di restauro; poiché il colore nello spazio sRGB viene descritto dai tre canali R (rosso), G (verde) e B (blu), per ogni finestra selezionata ho individuato le coordinate (*canali*) R, G, B di ogni singolo pixel facendone poi una media e potendo così valutare il colore complessivo e le intensità dei singoli canali.

Di seguito vengono riportati, a titolo di esempio, i risultati dell’elaborazione dei dati analitici relativi alla classe del bianco:

Sull’asse delle ordinate sono indicati i livelli di grigio, ossia l’intensità luminosa percepita dai fotorecettori del dispositivo CCD della fotocamera nel momento in cui è stata scattata la foto. Sull’asse delle ascisse, invece, sono mostrati i diversi ritagli di ogni formella. Le singole formelle sono identificate dai differenti colori delle colonne negli istogrammi.

Il canale R (Red):

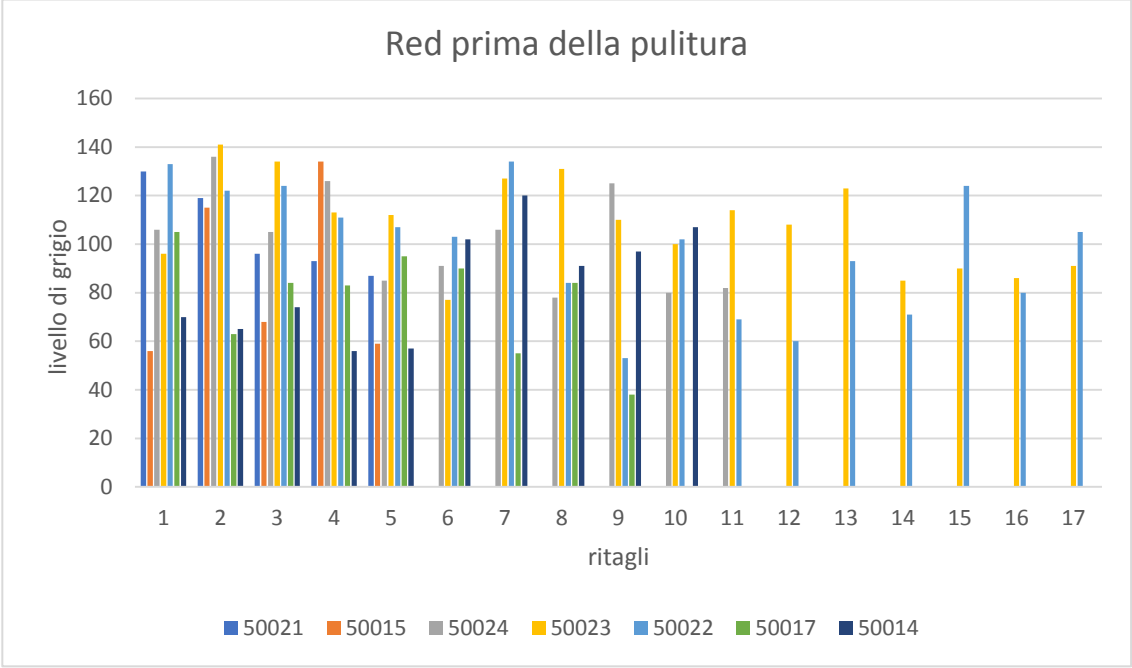


Figura 3.11a.

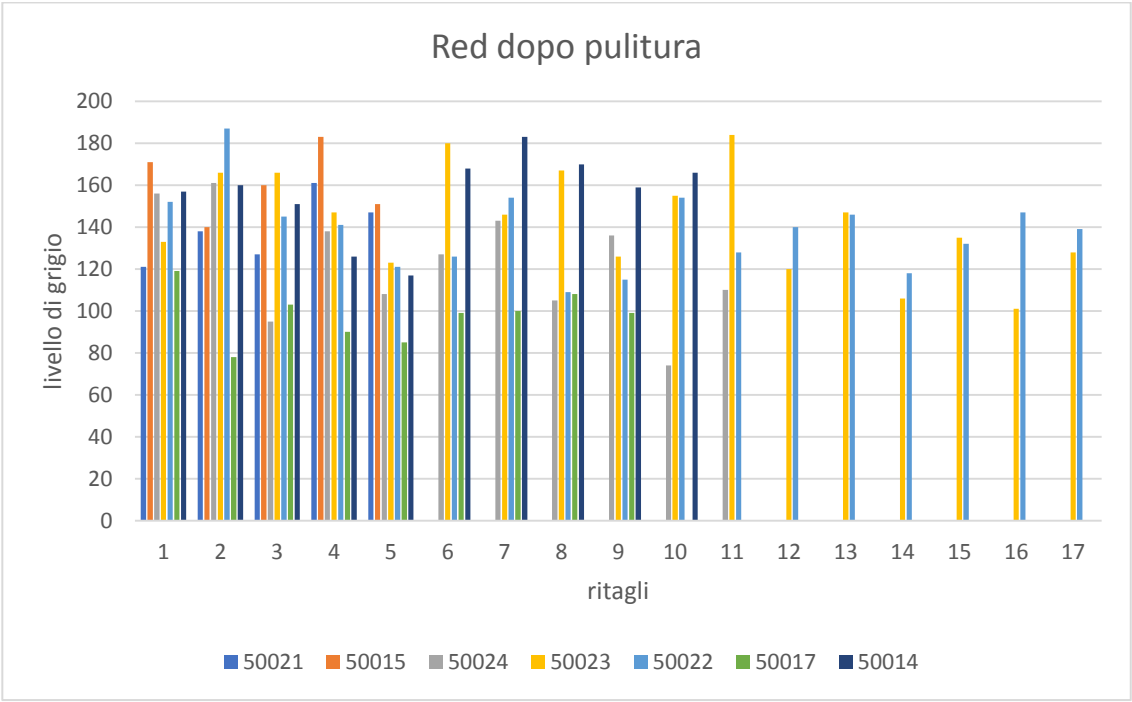


Figura 3.11b.

Il canale G (Green)

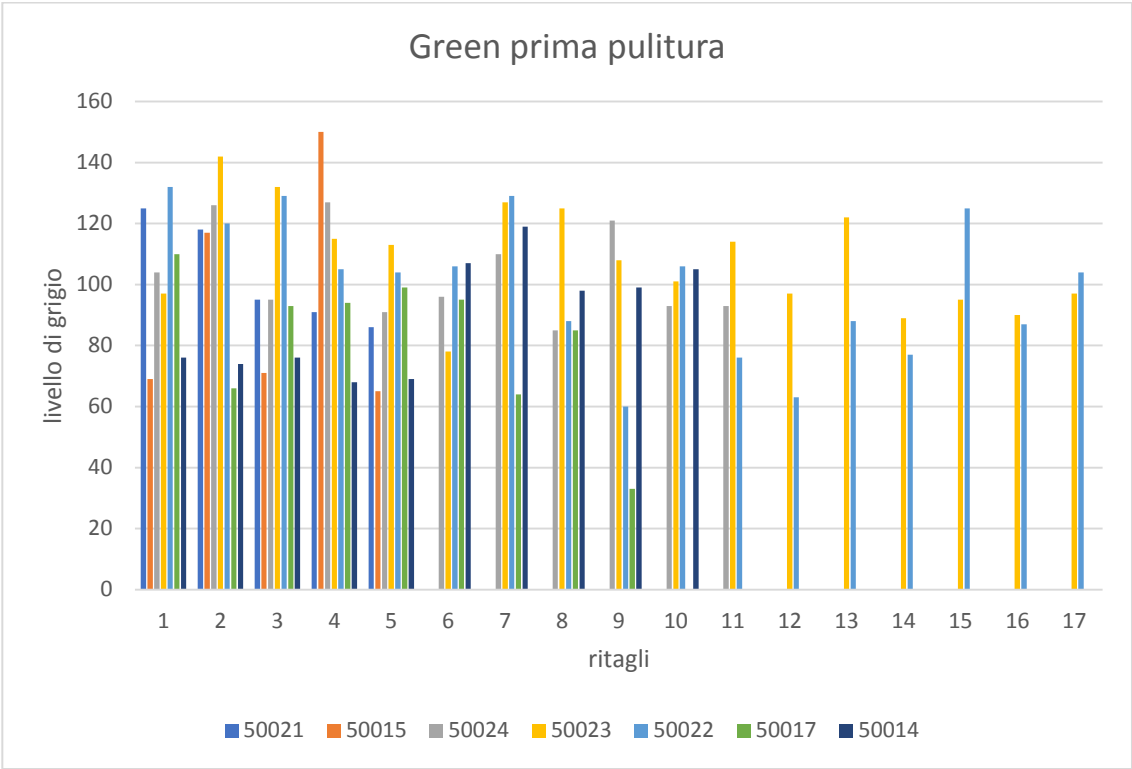


Figura 3.12a

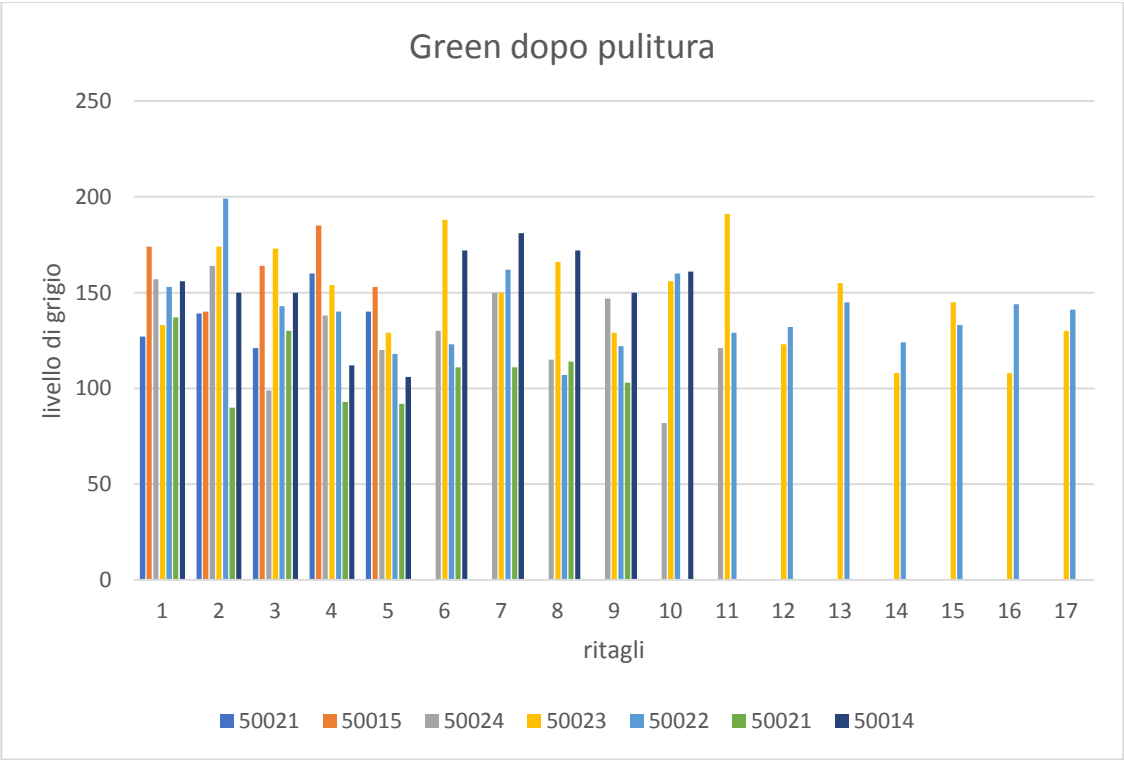


Figura 3.12b

Il canale B (Blu)

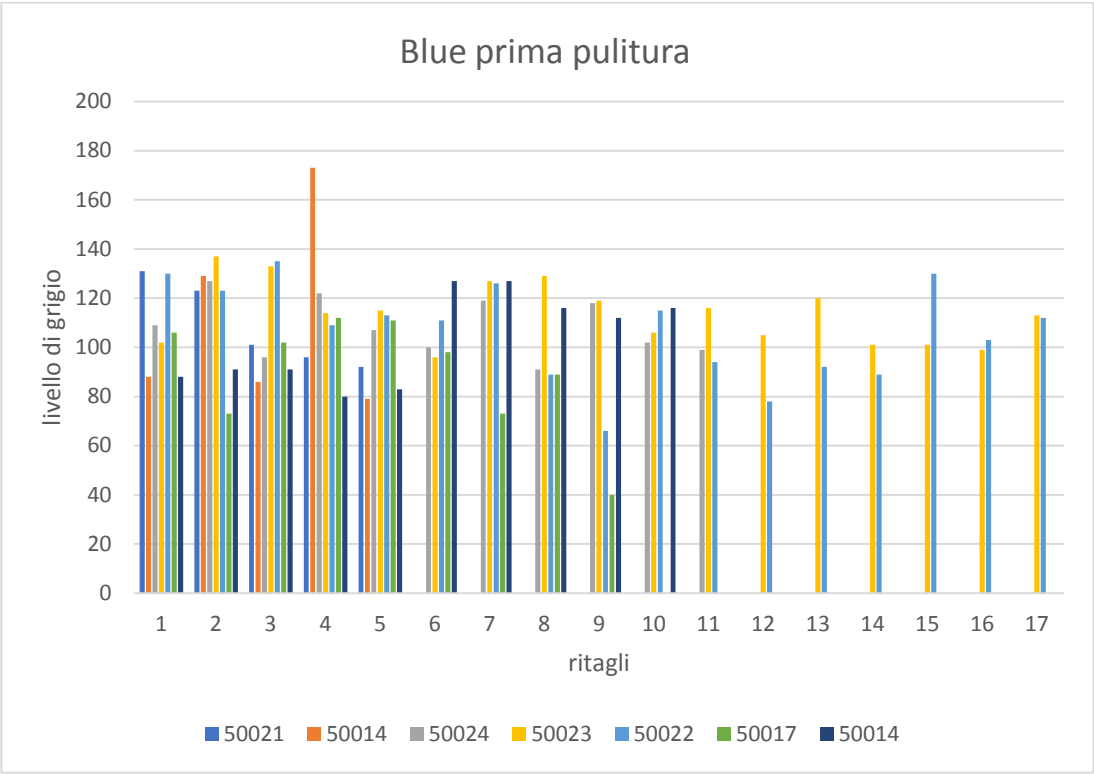


Figura 3.13a

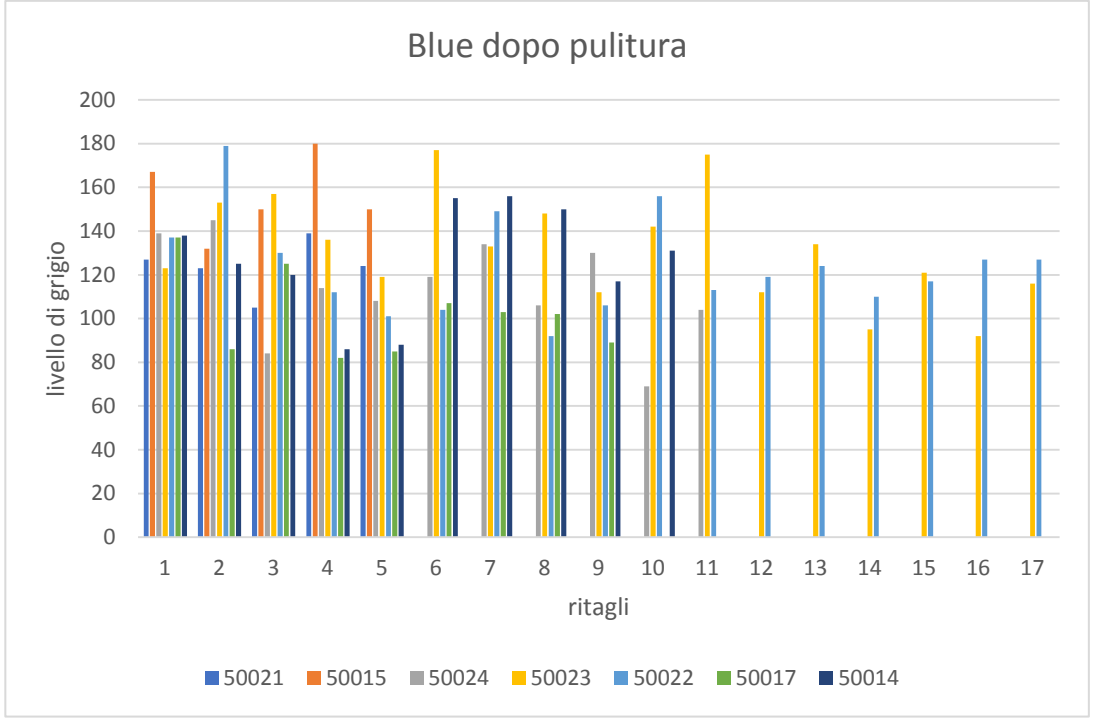


Figura 3.13b

Come risultato dell'elaborazione analitica, è evidente come i livelli di grigio siano aumentati dopo il restauro nei diversi canali per tutti le finestre prese in esame, salvo rarissime eccezioni.

Digitalmente le tre componenti cromatiche (ossia i tre canali R, G e B) possono assumere valori tra lo 0 e il 255: se un canale ha valore 0 significa che non ha cromia, se ha valore 255 significa che è alla sua massima intensità di livelli di grigio. Ad esempio, il canale Rosso sarebbe indicato da (255, 0, 0) mentre un arancione da (200, 155, 0).

Di seguito riporto le medie calcolate per ogni canale della classe del bianco al fine di mostrare, con maggiore precisione, come l'intervento di ripristino abbia agito sulla cromia delle formelle.

Prima della pulitura:

media R: 96,2973
media G: 98,63514
media B: 106,3649

il colore risultava essere un grigio con prevalenza della componente blu.

Dopo la pulitura:

media R: 136,1351
media G: 139,2431
media B: 124,0405

il colore tende ad essere un grigio più chiaro (cf. ad esempio una finestra della formella 50024 in Figura 3.14), con livelli di grigio più alti e prevalenza del tono giallo (rosso + verde = giallo, nella sintesi additiva).



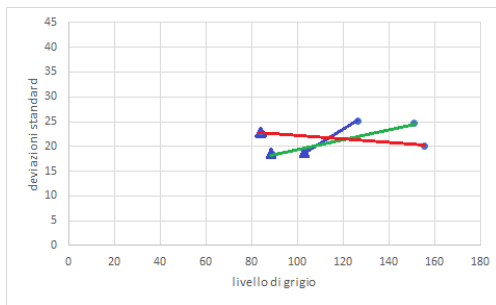
Fig.3.14a. Ritaglio della classe del bianco effettuato nel punto (1067,885) della formella n. 50024, prima della pulitura.



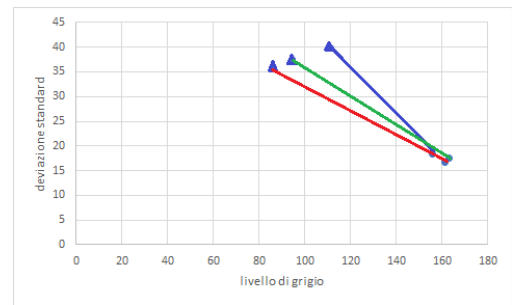
Fig.3.14b. Stesso ritaglio della classe del bianco della formella n. 50024, dopo la pulitura.

In una seconda tipologia di grafici, sempre nello spazio sRGB, sono stati confrontati (prima e dopo pulitura) i valori medi per ogni classe di colore dei livelli di grigio e delle deviazioni standard (ossia stima della variabilità dei dati sul colore acquisiti digitalmente) di ciascun canale R, G e B. Le intensità dei colori tendono a seguire una regola generale, ossia un loro aumento dopo gli interventi di trattamento laser e gel, mentre le deviazioni standard variano molto e non possono essere generalizzate in un'unica norma. Riporto in Figura 3.15, a titolo di esempio, una serie di grafici relativi, per diverse formelle, ai tre canali per la classe del bianco.

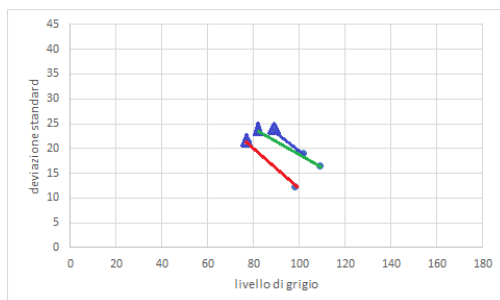
La classe del bianco (i triangoli blu indicano le formelle prima della pulitura, i puntini il dopo):



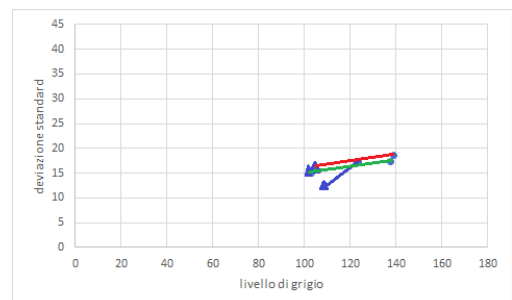
Formella 50014



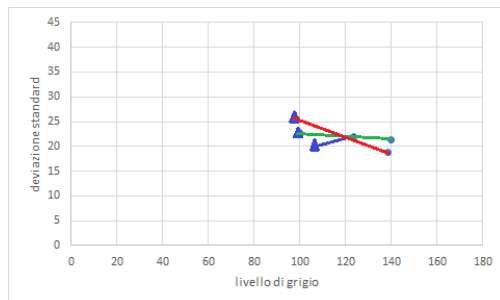
Formella 50015



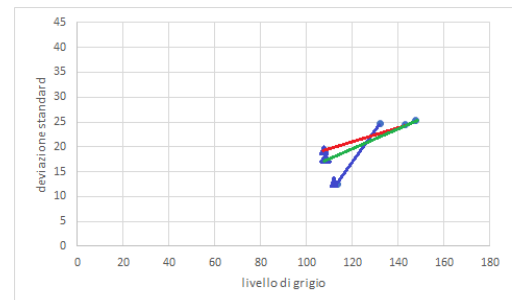
Formella 50017



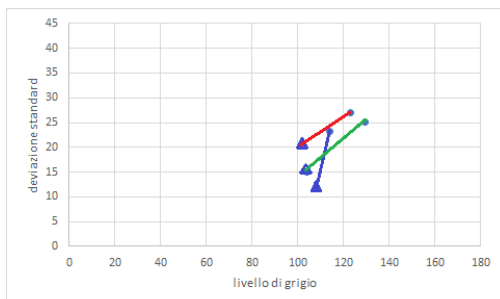
Formella 50021



Formella 50022



Formella 50023



Formella 50024

Figura 3.15. Comportamento dei tre canali, R, G, B, prima e dopo il restauro delle cromie bianche.

Una terza tipologia di elaborazione grafica consiste nel riportare i colori di ogni classe, suddivisi per formella, nello spazio RGB; da questi grafici (Figure 3.16a e 3.16b) si evince come i colori prima della pulitura fossero prevalentemente grigi mentre dopo pulitura risulta più visibile il colore nascosto dalla corrosione/sporco.

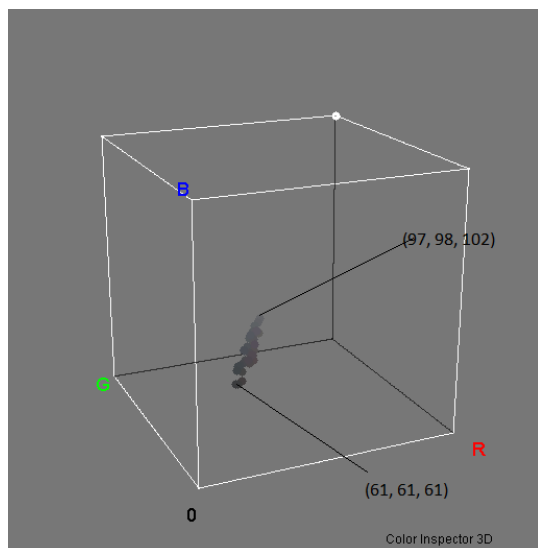


Fig.3.16a. Colore del bianco della formella 50024 prima della pulitura

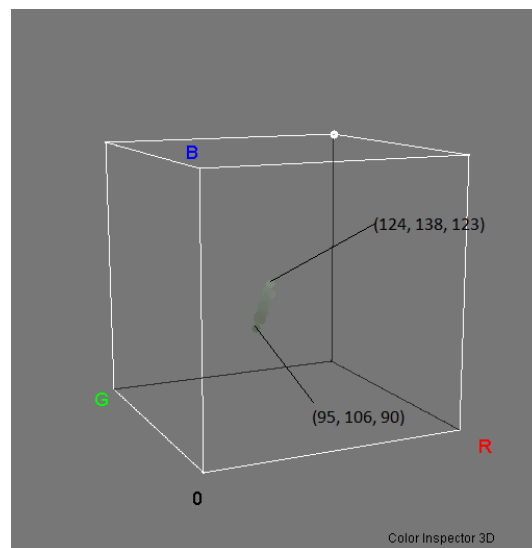


Fig.3.16b. Colore del bianco della formella 50024 dopo la pulitura

I valori colorimetrici sono stati trasformati dallo spazio sRGB allo spazio HSV (uno spazio digitale che descrive il colore secondo le coordinate Hue, la tinta, Saturation, la saturazione, e Value, l'intensità luminosa); i dati sono stati confrontati, ponendo come ascisse le tinte (cioè il colore percepito) per ogni classe delle corrispettive formelle, e, come ordinate, le rispettive saturazioni (concetto legato alla purezza del colore).

Le saturazioni non seguono un andamento costante mentre le tinte, per ogni classe, passano da un colore sul bluette al colore dal comportamento ottico presumibilmente più vicino a quello degli stessi pigmenti non degradati: riporto in Figura 3.17 un esempio.

In conclusione dai grafici si nota come la pulitura svolta dall'azione congiunta della Dott.ssa Roberta e della Dott.ssa Brunetto abbia ripristinato in maniera significativa l'antico prestigio delle formelle, rendendole più leggibili ed offrendo una migliore comprensione della tecnica artistica con cui sono state realizzate; si deduce, inoltre, che non è stata causata alcuna alterazione cromatica del materiale in seguito all'azione meccanica del laser o quella chimica dei solventi.

Si ipotizza, in più, che quasi tutti i colori prima della pulitura presentavano una netta prevalenza del colore blu a causa, con tutta probabilità, del fenomeno di diffrazione di una superficie resa più ruvida ed incoerente in seguito alla formazione di uno strato di sporco e, soprattutto, di corrosione.

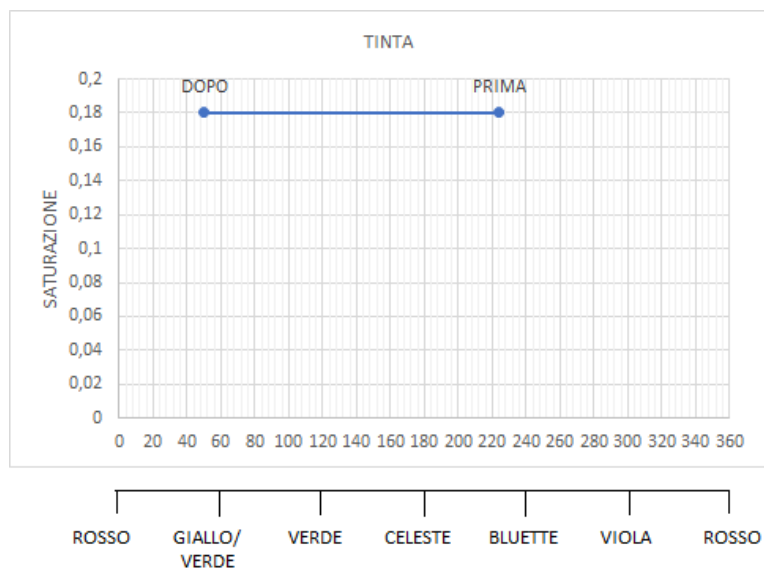


Figura 3.17. Comportamento della saturazione rispetto alla tinta nello spazio HSV della classe del bianco relativa alla formella 50014.

Capitolo 4

Il colorimetro

Il progetto ha previsto l'utilizzo di un colorimetro al fine di acquisire le misure colorimetriche da utilizzare come misure di riferimento per la definizione ed ottimizzazione della *caratterizzazione* della macchina fotografica. Il colorimetro utilizzato è il Konica Minolta CM-2600d di Figura 4.1, uno strumento portatile, designato per valutare il colore, la lucentezza relativa e le caratteristiche in UV di campioni sia piccoli che grandi, particolarmente se aventi una superficie liscia. Il Konica Minolta CM-2600d è compatibile con il software SpectraMagic NX (fornito in dotazione dalla ditta Konica Minolta) per registrare le misure acquisite e fornire una più comprensiva analisi del colore⁵⁴.

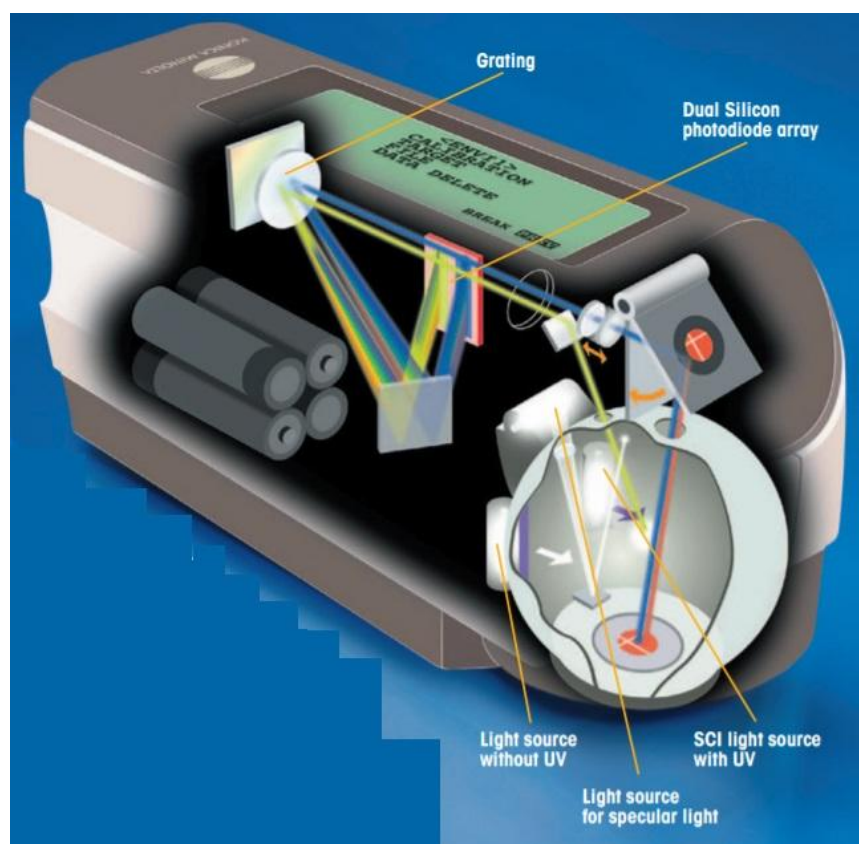


Figura 4.1. Colorimetro Konica Minolta CM-2600d.

Come illustrato nella Figura 4.1 lo strumento, prima di essere azionato, deve appoggiarsi perfettamente alla superficie del campione, affinché non vi siano radiazioni luminose parassite tra i dati in raccolta per l'analisi colorimetrica. Al suo interno lo spettrofotometro è caratterizzato da una sfera integratrice, o sfera di Ulbricht, per l'acquisizione dati: si tratta di una sfera cava con superficie interna perfettamente diffondente che consente la riflessione totale della luce; in questo modo, in ogni suo punto la diffusione non dipende dalla posizione della sorgente ma è proporzionale al flusso

⁵⁴ <https://sensing.konicaminolta.us/products/cm-2600d-spectrophotometer/>

luminoso^{55,56}. Il tipo di geometria d'illuminamento, pertanto, è illuminazione diffusa con fotorivelatore posto a 8° rispetto alla normale del piano del campione; la sorgente luminosa è una lampada allo xeno. Il flusso luminoso d'indagine, quello riflesso dal campione, viene poi registrato da una matrice di fotodiodi di silicio, ovviamente prima di giungere alla matrice detector il raggio viene scomposto, nelle sue diverse radiazioni elettromagnetiche, attraverso un reticolo di diffrazione e diretto nella traiettoria desiderata mediante opportuni specchi. Quindi i raggi, così scomposti ed indirizzati, vengono rilevati da una matrice di fotodiodi al silicio, ossia sensori capaci di trasformare la luce incidente su di essi in carica elettrica.

Il fotodiodo usato per il colorimetro Konica Minolta è del tipo “dual silicon” formato da due catodi separati e da un anodo comune. Come visibile in Figura 4.2, le due parti hanno forma triangolare e sono avvicinate in modo che la loro interfaccia cada sulla diagonale della faccia del componente.

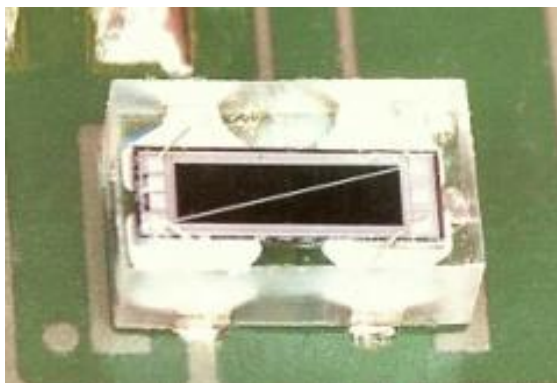


Figura 4.2. *Dual silicon Photodiode.*

Una volta che il fotodiodo ha rilevato le diverse radiazioni elettromagnetiche, il segnale elettrico generato viene elaborato con opportuni algoritmi e tramite il software “SpectraMagic NX” (il software associato al Konica Minolta CM-2600d) è possibile avere informazioni riguardanti i dati colorimetrici e la riflettanza dei materiali misurati (Figura 4.3).

⁵⁵ <https://www.biofotonica.it/tecnologie/sfere-integratrici/>

⁵⁶ Vacca U., *Sicurezza in galleria ferroviaria: studio e progettazione di un sistema innovativo d'illuminamento a sorgenti LED*, tesi di laurea magistrale in Ingegneria Elettronica, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Padova, 2011-2012.

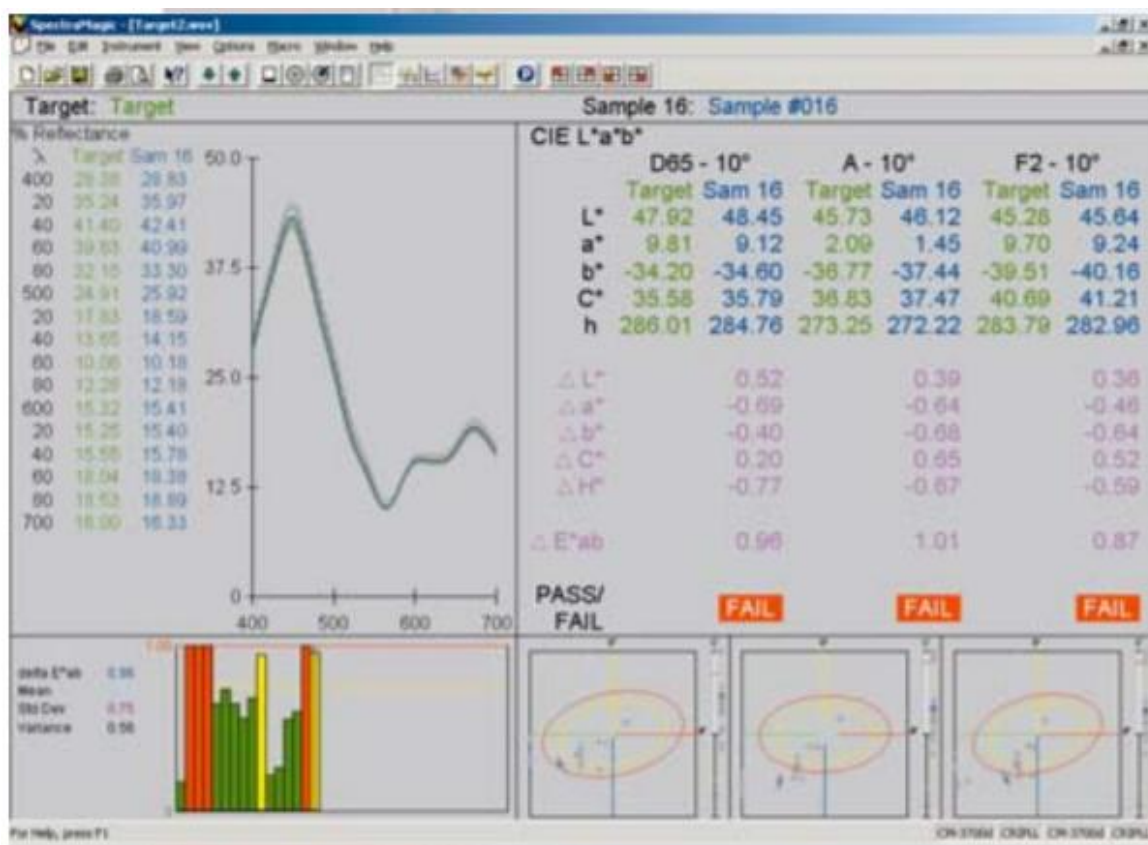


Figura 4.3. Visualizzazione dei dati colorimetrici nella finestra del software SpectraMagic NX.

In questo progetto il colorimetro Konica Minolta CM 2600d è sempre stato impostato con l'illuminante D65 ed osservatore standard 10°; inoltre sono sempre state acquisite 5 misure spettrofotometriche per ogni campione in ogni serie di misurazione.

Capitolo 5

La fotocamera digitale

Il primo prototipo di una macchina fotografica digitale fu prodotto nel 1975 ad opera di un ricercatore della Kodak, Steven Sasson, ed era in grado di registrare un'immagine con una risoluzione di 10 Kpixel memorizzandone i dati su cassetta (Figura 5.1, immagine di sinistra); il suo brevetto venne depositato nel 1978 ma ci vollero diversi anni di ricerca e tentativi prima che la qualità delle immagini fosse tale da rendere commercializzabile la macchina fotografica digitale.

La prima macchina fotografica digitale immessa sul mercato fu la Mavica FD5 (Figura 5.1, immagine di destra), proposta dal fondatore della Sony, Akio Morita, nel 1981⁵⁷. Questa utilizzava come supporto di memoria un floppy disk e realizzava foto con una risoluzione di 570x490 pixel. Dopo un inizio incerto, perché non venne ben accolta come innovazione da parte della maggior parte dei fotografi professionisti, prese il sopravvento tanto che ad oggi è ampiamente diffusa ed ha sostituito la macchina fotografica a pellicola grazie alle migliorate caratteristiche generali, alla qualità degli obiettivi ed allo sviluppo di software di post-produzione, che permette ai fotografi stessi di esprimere maggiormente la propria originalità e personalità. Nel 1987, infatti, uscì sul mercato il software Photoshop, allora denominato Display, il quale era capace di riprodurre immagini in bianco e nero. Nel 1990 Display incontra Adobe e nasce Adobe Photoshop, ad oggi uno dei software più noti ed apprezzati nel fotoritocco⁵⁸.



Figura 5.1. A sinistra: modello del primo prototipo di fotocamera digitale sviluppato da Steve Sasson nel 1975. A destra: modello della Sony Mavica FD5, la prima macchina fotografica digitale commercializzata.

⁵⁷ <https://www.nikonschool.it/corso-breve-storia-fotografia/1981-1999.php>

⁵⁸ <https://laba.biz/storia-della-fotografia-digitale/>

Comunque, motivo predominante della rapida diffusione della fotocamera è il miglioramento della tecnologia fotografica stessa, con la produzione di diversi modelli di fotocamere, reflex o compatte, e qualità di immagine sempre più elevate e rispondenti alle diverse esigenze dei fotografi, dai professionisti ai meno esperti.

Alla base del funzionamento della macchina fotografica vi è il fotosensore, ossia il mezzo attraverso cui la fotocamera “vede” la realtà esterna e ne registra i fatti. Il fotosensore è in grado di tradurre la luce incidente in carica elettrica, la quale, tramite ausili tecnologici secondari, viene a sua volta trasformata in segnale analogico e poi digitale, permettendo la visualizzazione della foto su uno schermo. Esistono due tipi di sensori: il CMOS e il CCD: quest’ultimo fu il sensore alla base dei primissimi prototipi di macchina fotografica digitale.

Una macchina fotografica oltre a questi sensori, di norma è composta da diverse parti, come descritto in Figura 5.2.

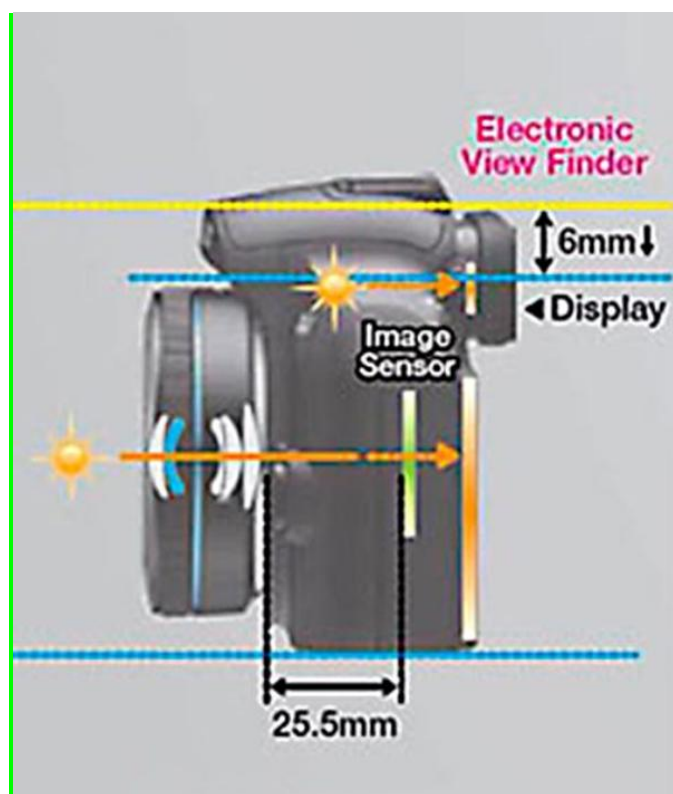


Figura 5.2. Schema di come è composta una macchina fotografica.

La luce attraversa diversi settori della fotocamera:

- entra nell'obiettivo, dove viene indirizzata mediante il set di lenti; è inoltre presente il diaframma, un set di lamelle che si possono allargare o restringere regolando la quantità di luce che entra nell'apparecchio fotografico;
- una volta che la luce ha attraversato l'obiettivo incide sul fotosensore, quindi si ha la registrazione momentanea della realtà esterna;

- quando viene premuto il pulsante dello scatto viene attivato l'otturatore che permette il passaggio della luce verso il fotosensore; a seconda del tempo di scatto l'apertura dell'otturatore può essere più o meno lunga: questo significa anche una maggiore o minore incidenza di luce sul fotosensore⁵⁹.

Le fotocamere digitali forniscono foto in diversi formati; ogni casa produttrice ha il suo formato fotografico, ma in linea di massima il formato di una foto è il RAW, ossia un formato che contiene tutte le informazioni della macchina fotografica senza alcuna compressione o perdita. Ogni casa produttrice ha il suo formato RAW: ad esempio la Nikon ha il formato NEF mentre la Panasonic (la marca della macchina fotografica utilizzata in questo progetto) usa il formato RW2.

Oltre ai formati RAW ne esistono altri che permettono di conservare i dati acquisiti dallo strumento ma di occupare meno spazio nella memoria della periferica utilizzata, quale ad esempio un computer; in questo progetto si è lavorato con il formato TIFF, anche perché alcuni programmi utilizzati non leggono il formato RW2 della Panasonic. Il formato JPEG è uno dei formati più ampiamente utilizzati nella diffusione di immagini digitali perché occupa poco spazio nella memoria, ma è meno soddisfacente ai fini del presente progetto perché perde alcune delle informazioni acquisite dalla macchina fotografica.

5.1. Il sensore CCD

Il sensore CCD (Charge-Coupled Device) nasce nel 1969 nei Bell Laboratories di Murray Hill per opera dei ricercatori Bill Boyle e George Smith. Si tratta di un circuito integrato realizzato su silicio che utilizza elementi sensibili alla luce, i cosiddetti photosite (fotositi), che trasmettono le cariche elettriche generate all'esterno del circuito.

Il sensore CCD è composto da due parti: la matrice dei fotosensori ed il filtro ottico; quest'ultimo di solito è disposto sopra la matrice in maniera che la luce che colpisce ogni elemento sia filtrata secondo specifici intervalli di frequenze nello spettro del visibile. I fotosensori sono elementi a semiconduttore che, una volta colpiti dalla luce, forniscono una carica elettrica proporzionale all'intensità della luce incidente.

Il filtro-colore ottico è una matrice di tre diversi filtri passa-banda e ciascuno di questi è posizionato sopra un singolo fotosensore; di norma i filtri maggiormente utilizzati sono quelli che lasciano passare lunghezze d'onda nelle bande di frequenza rispettivamente del rosso, del verde e del blu. Questi filtri possono essere disposti in diverse modalità ma la configurazione più ampiamente diffusa è quella del filtro Bayer, suddivisibile in sezioni quadrate composte da 2 x 2 filtri: uno del blu, uno del rosso e due del verde (Figure 5.3 e 5.4); nel complesso la configurazione proposta da Bayer presenta una maggiore quantità di filtri del verde perché cerca di simulare la maggiore sensibilità alla luce verde dell'occhio umano.

⁵⁹ G.Gulli, *La macchina fotografica digitale*, dispensa del corso in Tecnologia Audio Video", ITIS Ferraris San Giovanni La Punta, Catania, 2014.

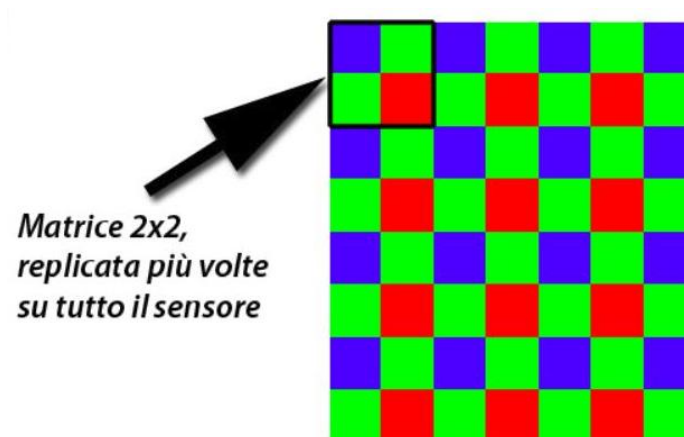


Figura 5.3. Configurazione del modulo base del filtro Bayer.

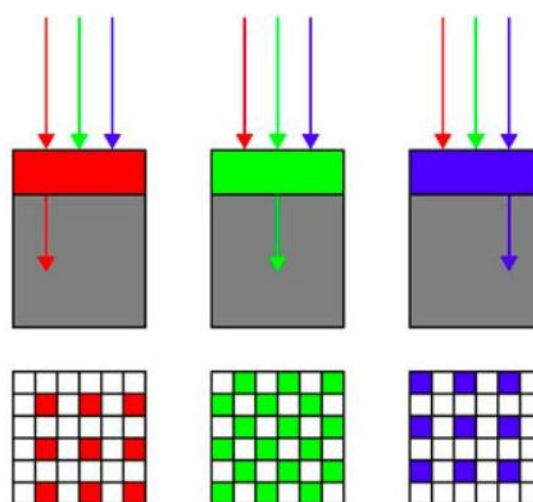


Figura 5.4. Scomposizione di come sono disposti i diversi filtri nella configurazione Bayer.

Il fotosito del sensore CCD è un condensatore MOS (metallo - ossido – semiconduttore) i cui elettrodi sono uno strato di materiale conduttore detto *gate* e un substrato (detto *body* o *corpo*) di materiale semiconduttore drogato. Un sottile strato isolante, di solito ossido di silicio (SiO_2), è posto all'interfaccia. I tre strati sono affiancati da due terminali, detti *source* e *drain* (Figura 5.5).

In un CCD si aumenta notevolmente la tensione di *gate* e si espone il condensatore alla luce in maniera da provocare un effetto fotoelettrico; infatti una percentuale dei fotoni che raggiunge il fotosensore⁶⁰ viene assorbita, in funzione dell'energia di ciascun elettrone, dagli atomi accettori di elettroni. Se l'energia assorbita è sufficiente si libera un elettrone, che sotto l'effetto del campo magnetico generatosi si sposta verso lo strato di ossido più prossimo al *gate*.

Il segnale digitale, così ottenuto, verrà elaborato da altri circuiti e da specifico software per restituire l'immagine fotografica.

⁶⁰ Fratini A., Dispositivi per la cattura delle immagini, I sensori CCD, dispense del corso in Elaborazione di Dati e Segnali Biomedici, Dipartimento di Ingegneria Elettrica e delle Tecnologie dell'Informazione, Università degli Studi di Napoli.

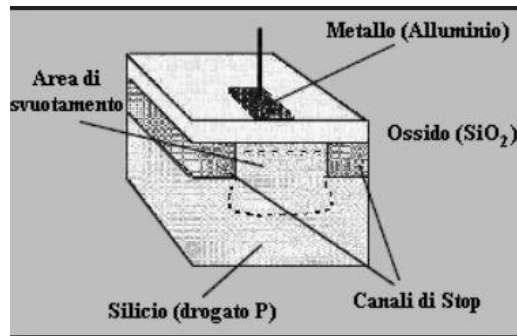


Figura 5.5. Schematizzazione di un condensatore MOS nelle sue singole parti.

5.2. Il sensore CMOS

Il sensore CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) si distingue dal CCD perché ogni fotosito ha incorporato un proprio amplificatore, e fornisce direttamente un segnale analogico piuttosto che elettrico. La tecnologia CMOS esisteva già negli anni '70 ma solo negli ultimi anni c'è stato un enorme ed evolutivo interesse nei suoi confronti.

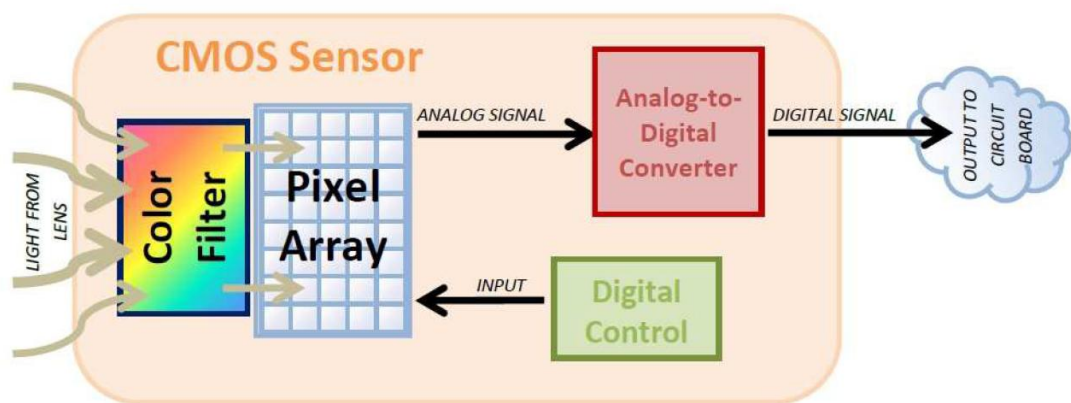


Figura 5.6. Schematizzazione del sensore CMOS.

Il sensore CMOS è più complesso e costoso nel costruirlo; tuttavia, proprio perché ingloba più dispositivi al suo interno, riduce i tempi e i costi di produzione complessivi di uno strumento e per questo motivo ad oggi la maggior parte delle macchine fotografiche è costruita con questo sensore.

Nonostante l'evoluzione tecnologica, non vi è una così sostanziale differenza tra sensore CMOS e sensore CCD; tuttavia durante il presente progetto ho svolto un confronto tra apparecchi fotografici aventi questi due sensori per valutare sia la stabilità del metodo che la performance dei diversi sensori (Capitolo 9).

Capitolo 6

La caratterizzazione del dato fotografico: il set di dati

Come chiaramente già espresso nella parte introduttiva del presente lavoro di tesi, la facilità di uso ed altri vantaggi, sia tecnici che economici, di una fotocamera digitale, ne rendono l'eventuale utilizzo per una definizione del colore sia qualitativa che quantitativa (in sostituzione di uno strumento analitico indubbiamente più sofisticato e quindi più complesso come il colorimetro) un obiettivo di estremo interesse pratico.

I limiti oggettivi nella definizione quantitativa del colore possono essere superati mediante una elaborazione dell'immagine digitale tramite l'uso di metodologie appositamente predisposte al fine di correggere i dati acquisiti sul colore nel digitale approssimandoli a quelli colorimetrici, ossia mediante quella operazione che viene comunemente definita *caratterizzazione* della macchina fotografica: individuare la relazione esistente tra come misura i colori la macchina fotografica e come li misura il colorimetro.

Nel Capitolo 3.3 è stata descritta la parte del lavoro di ricerca relativa ad un uso più squisitamente "qualitativo" di una fotocamera digitale finalizzato all'ottenimento di indicazioni oggettive, utili a verificare la validità di un processo di conservazione e restauro (caso di studio rappresentato dalle formelle dei "Misteri del Rosario" di Chiusanico).

Nel presente capitolo si comincia ad affrontare in maniera concreta il problema della *caratterizzazione* della fotocamera, dettagliando il complesso dei campioni utilizzati a tal fine (*dataset*). Argomenti dei successivi capitoli saranno una breve descrizione dei metodi di *caratterizzazione* di letteratura (Capitolo 7) e l'applicazione di tali metodi a casi di studio, con il conseguente sviluppo di un metodo originale ed un confronto tra quest'ultimo e i metodi di letteratura (Capitoli 8-11).

Per valutare l'approccio più idoneo per la *caratterizzazione* della fotocamera digitale sono stati utilizzati diversi set di dati di riferimento: un set è composto dai 24 tasselli costituenti la scala colore ColorChecker Passport Photo X-Rite mentre gli altri set sono costituiti da campiture pittoriche acquisite nel corso degli ultimi due anni di dottorato, uno (una tela) realizzato durante il secondo anno di dottorato presso il Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale (DCCI) dell'Università di Genova, l'altro (due tavole) proveniente dal Centro per la Conservazione e il Restauro "La Venaria Reale", le cui misure sono state realizzate verso l'inizio del terzo ed ultimo anno di ricerca.

6.1. Scala colore ColorChecker Passport Photo X-Rite

Il primo *dataset* utilizzato è rappresentato dai 24 tasselli della scala colore della ditta X-Rite (Figura 6.1), una delle più diffuse ed affidabili scale di riferimento nel settore fotografico per quanto riguarda la riproduzione del colore. Il target della ColorChecker è studiato per garantire una riproduzione realistica del colore, consentendo ai fotografi di prevedere e controllare l'aspetto

cromatico in qualunque situazione d'illuminazione. Il set consiste in una serie di 24 tasselli di colori naturali, cromatici, primari e della scala dei grigi, realizzati con alcuni particolari accorgimenti. Molti di questi tasselli riproducono l'aspetto visivo di oggetti naturali come la cute umana, il cielo o la vegetazione. La ditta X-Rite ha studiato appositamente la superficie di ogni tassello in maniera da riflettere la luce nello stesso modo in cui la riflette l'oggetto cromatico che rappresenta.



Figura 6.1. Scala colore per il settore fotografico: ColorChecker Passport Photo della ditta X-Rite.

I valori colorimetrici esatti del ColorChecker Passport Photo sono forniti dal produttore (DXC1), ma sono stati anche valutati sperimentalmente con il colorimetro; in questo caso il *dataset* è denominato DXC2 e contiene 5 misure ripetute per ogni tassello, in scala Lab.

In un primo momento la scala è stata usata come set di dati per calcolare il modello caratterizzante la macchina fotografica.

Dataset DXF1: le foto sono state scattate regolando lo strumento fotografico in modalità automatica, posto perpendicolarmente al campione a una distanza di circa $76,5 \pm 0,5$ cm; i campioni (tasselli) sono stati posti su un piano ricoperto da cartoncini scuri (per ridurre possibili effetti di luce inquinante) e focalizzando l'inquadratura su ogni tassello considerato. Per ogni tassello sono stati eseguiti 5 scatti fotografici. Per ogni foto di ciascuno tassello si considerano 5 finestre quadrate sull'immagine (di dimensioni 6x6 pixel), non sovrapposte, da cui si ricava il valore medio complessivo.

Il set fotografico utilizzato è stato stabilito in conformità alle normative CIE e tenendo in considerazione che si sarebbe poi usato come sistema di riferimento lo spazio CIE Lab, illuminante D65, osservatore standard 10° e geometria ottica $45^\circ:0^\circ$ ossia con gli illuminanti posti a $45^\circ:0^\circ$ rispetto alla normale al piano d'appoggio del campione e con il rilevatore disposto

perpendicolarmente al campione; a tal fine, oltre ad aver posto la macchina fotografica perpendicolarmente al campione l'illuminazione utilizzata è consistita in due lampadine LED della OSRAM che simulano il D65 disposte a 45° rispetto al piano d'appoggio del campione^{61,62}.

In conclusione, il *dataset* DXF1 contiene 24 vettori RGB, ognuno media di altrettanti 5x5 vettori RGB.

6.2. Tela preparata presso il DCCI secondo i suggerimenti di Giorgio Vasari

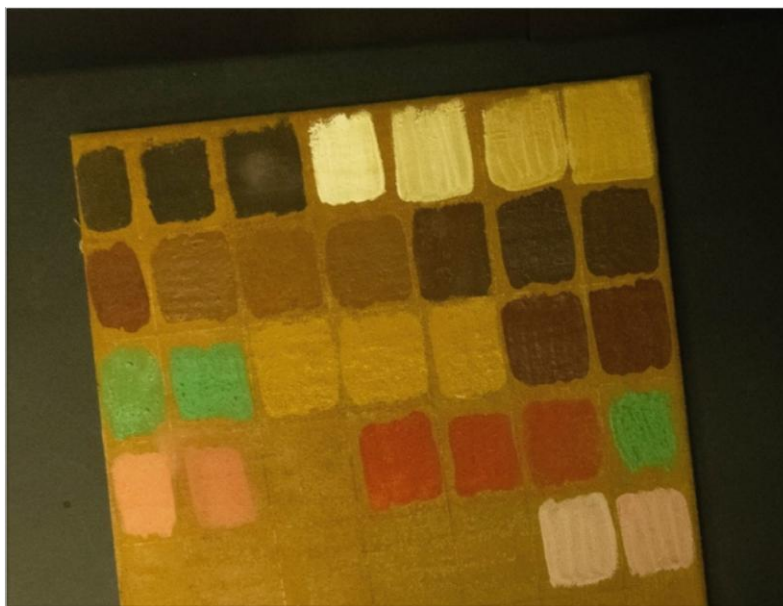


Figura 6.2: Tela realizzata presso il DCCI secondo le indicazioni del Vasari.

Durante il secondo anno di dottorato è stata realizzata una tela seguendo le indicazioni riportate nel testo *“Le vite de più eccellenti pittori, scultori e architettori”*, scritto nel Cinquecento dal pittore, architetto e storico dell’arte toscano Giorgio Vasari⁶³.

Diversi sono stati i tentativi per realizzare questa tela, perché Vasari suggerisce i materiali da usare ma non dà indicazioni né sulle quantità né sui tempi di realizzazione (ad esempio per quanto tempo lasciare asciugare una preparazione prima della stesura di uno strato sovrastante). Nel realizzare questa tela sono stati seguiti, anche, i consigli della restauratrice Roberta Moggia che, grazie alla sua esperienza, conosceva le possibili complicità nella realizzazione della tela.

Realizzazione della tela con stesure di campioni cromatici.

La tela di *lino* è stata montata su un telaio in legno di 40 cm x 50 cm; prima di stendere l'imprimatura, il fondo e le campiture da misurare la tela, inchiodata sul telaio, è stata bagnata con acqua calda e lasciata asciugare a temperatura ambiente per un giorno, smontata e rimontata sullo stesso telaio. Nel frattempo è stata preparata la *colla di coniglio* per realizzare i primi strati per la

⁶¹ SanMartin P., Chorro E., Varquez-Nion D., Martinez-Verdù F.M., Prieto B., *Conversion of a digital camera into a non-contact colorimeter for use in stone cultural heritage: The application case to Spanish granites*, Measurement, 2014.

⁶² Goni S.M., Salvadori V.O., *Color measurement: comparison of colorimeter vs. computer vision system*, Food Measure, 2016.

⁶³ http://vasari.sns.it/cgi-bin/vasari/Vasari-all?code_f=print_page&work=le_vite&volume_n=1&page_n=132

stesura della pellicola pittorica: sono stati mescolati circa 30 g di colla di coniglio con circa 300 g d'acqua, e la soluzione è stata lasciata a riposo per circa 12 ore a temperatura ambiente, in maniera che la colla assorbisse una sufficiente quantità di acqua. Passate le 12 ore la colla è stata posta a bagnomaria per circa mezz'ora ed una volta ottenuta la consistenza idonea ne sono stati stesi diversi strati sulla tela ormai asciutta e rimontata sul telaio. Gli strati sono stati stesi nella maniera più omogenea possibile; i primi due strati sono stati ottenuti con pennellate perpendicolari alla trama del tessuto di lino, il terzo strato con pennellate parallele alla trama, l'ultimo strato è stato steso nella stessa direzione del primo strato. Si è atteso un giorno affinché la colla si asciugasse correttamente, sempre a temperatura ambiente, e poi si è proceduto con la stesura, sempre con pennellate omogenee, dell'*imprimitura*, preparata secondo i suggerimenti del Vasari: circa 30 g di *farina* setacciata sono stati mescolati con circa 10 g di *biacca* e circa 21 g di *olio di noce*. Una volta steso l'impasto, si è atteso un giorno prima di procedere con il passaggio successivo. Una volta asciutta l'*imprimitura* sono stati stesi altri due strati di colla di coniglio, il primo perpendicolarmente alla trama della tela, il secondo nella direzione perpendicolare alla prima stesura. Atteso un altro giorno per l'asciugatura della colla è stato realizzato il fondo, sul quale sarebbero stati stesi i diversi campioni come parte del *dataset* per la *caratterizzazione* della macchina fotografica. Il fondo è stato realizzato nella maniera seguente: 4 g di *olio di lino crudo*, 4 g del pigmento *ossido di ferro*, 2 g di *terra d'ombra bruciata*, 2 g di *terra di Siena bruciata* (tutte "ocre") e 10 g di *biacca* (carbonato basico di piombo). Una volta che il fondo si è sufficientemente asciugato (circa 3 giorni, mantenendo la tela a temperatura ambiente) sono state stese le diverse campiture da analizzare, suddividendo la tela in settori rettangolari di circa 7,5 x 5/6 cm, semplicemente solcando il fondo con spatolina e righello.

Le campiture sono state realizzate con la *tecnica della pittura ad olio*, utilizzando olio di lino crudo come legante e stendendo i vari pigmenti in diverse concentrazioni (percentuale in peso del pigmento rispetto al legante), come riportato in Tabella 6.1.

#	Identificazione	Composizione % pigmento/legante (w/w)	Composizione chimica
1	Biacca I	65,8%	$(\text{PbCO}_3)_2 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$
2	Biacca II	69,0%	
3	Biacca III	69,2%	
4	Biacca IV	71,1%	
5	Ombra Naturale I	44,1%	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO}_2 + \text{nH}_2\text{O} + \text{Si} + \text{Al}_2\text{O}_3$
6	Ombra Naturale II	53,7%	
7	Ombra Naturale III	67,6%	
8	Ombra Bruciata I	37,0%	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO}_2 + \text{Si} + \text{Al}_2\text{O}_3$
9	Ombra Bruciata II	46,8%	
10	Ombra Bruciata III	61,3%	
11	Terra di Siena Naturale I	39,1%	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{nH}_2\text{O} + \text{MnO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$
12	Terra di Siena Naturale II	55,1%	
13	Terra di Siena Naturale III	58,0%	
14	Terra di Siena Bruciata I	37,0%	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{nH}_2\text{O} + \text{Al}_2\text{O}_3 (60\%) + \text{MnO}_2 (1\%)$
15	Terra di Siena Bruciata II	50,0%	
16	Terra di Siena Bruciata III	56,8%	

17	Ossido di ferro giallo I	45,3%	Fe ₂ O ₃ ·H ₂ O
18	Ossido di ferro giallo II	50,0%	
19	Ossido di ferro giallo III	53,5%	
20	Malachite I	42,0%	Cu ₂ CO ₃ (OH) ₂
21	Malachite II	47,0%	
22	Malachite III	57,9%	
23	Fondo	12,5% di Ossido di ferro giallo, 6,25% di Siena Naturale, 6,25% di Ombra Naturale, 31,25% di Biacca	

Tabella 6.1. Descrizione delle diverse campiture stese sulla tela presso il DCCI secondo le indicazioni del Vasari.

Sono state scelte prevalentemente delle ocre per mantenere maggiore coerenza storico-artistica con la tela stessa: avrebbe avuto poco senso realizzare una tela secondo le indicazioni del Vasari e poi stendere pigmenti realizzati nei secoli successivi. Le prime misure sulle campiture sono state eseguite dopo un mese dalla loro stesura, perché di norma questo è il tempo necessario alle pitture ad olio per essiccarsi; si è preferito procedere ad asciugatura naturale a temperatura ambiente piuttosto che mediante processi artificiali più veloci, onde evitare che la pellicola pittorica potesse staccarsi dal fondo o subire crepature.

Circa un mese dopo la realizzazione della tela sono state aggiunte altre tre campiture realizzate con il pigmento cinabro (Tabella 6.2).

#	Identificazione	Composizione % pigmento/legante (w/w)	Composizione chimica
24	Cinabro I	14,8%	HgS
25	Cinabro II	53,3%	
26	Cinabro III	61,2%	

Tabella 6.2. Descrizione delle diverse campiture stese nel secondo mese dalla realizzazione della tela presso il DCCI.

A due mesi di distanza dalla prima stesura sono state stese le ultime campiture, costituite dal colore rosa, ottenuto mescolando la biacca con il cinabro: in Tabella 6.3 sono riportate le campiture con le relative concentrazioni (percentuale in peso del miscuglio biacca + cinabro rispetto all'olio di lino).

#	Identificazione	Composizione % pigmento/legante (w/w)	Composizione chimica
27	Rosa I	38,96%	Il pigmento è stato ottenuto dalla mescolanza di biacca con cinabro.
28	Rosa II	57,76%	
29	Rosa III	66,02%	
30	Rosa IV	73,04%	

Tabella 6.3. Descrizione delle diverse campiture realizzate con il colore rosa nel terzo mese dalla realizzazione della tela presso il DCCI.

Non è stata stesa alcuna resina o vernice protettiva sulle campiture per evitare, durante le fasi di acquisizione (con la fotocamera e/o con il colorimetro), possibili difficoltà legate alla riflessione della luce da parte della pellicola trasparente protettiva.

Nel complesso, tranne i primi tre mesi di studio sulle campiture pittoriche, sono sempre state considerate, studiate e misurate tutte le campiture, includendo come ulteriore campione pittorico anche un riquadro del fondo stesso.

I *dataset* così realizzati sono denominati DGm/yC e DGm/yF, per quanto riguarda rispettivamente le misure colorimetriche e il dato fotografico del mese m (espresso con i numeri romani da I a XII) dell'anno y (18 o 19).

Sono state sempre effettuate 5 misure per il colorimetro e 9 misure per la macchina fotografica su ogni tassello/campione considerato, a cadenza mensile.

Per il *dataset* DGm/yF le foto sono state scattate ponendo lo strumento fotografico perpendicolarmente al campione a una distanza di circa $46,5 \pm 0,5$ cm. Le foto sono state eseguite sistemando i campioni su un piano ricoperto da cartoncini scuri e focalizzando l'inquadratura su ogni tassello considerato. La macchina fotografica è stata impostata come illustrato in Tabella 6.4 mentre il set fotografico è stato impostato come descritto per il *dataset* DXF1 relativo ai tasselli del ColorChecker Passport Photo (cf. Paragrafo 6.1).

Sensibilità ISO	400	Sensibilità del sensore alla luce stessa ⁶⁴ .
Diaframma	f/3.2	Indica un'ampia apertura del diaframma.
Tempo d'Esposizione	1/60 secondi	Il tempo durante il quale l'otturatore rimane aperto permettendo alla luce d'incidere sul sensore ⁶⁵ .
Impostazione	MANUALE	
Distanza focale	4 mm	Minore è la lunghezza focale e maggiore è la profondità di campo visivo ⁶⁶ .

Tabella 6.4: Parametri di impostazione della macchina fotografica.

6.3. Tavole preparate presso i laboratori di restauro del Centro per la Conservazione ed il Restauro dei Beni Culturali "La Venaria Reale".

Il Centro per la Conservazione e il Restauro (CCR) dei Beni Culturali "La Venaria Reale" ha consentito di poter usufruire di alcune sue tavole di studio per effettuarvi delle misure ed utilizzarle per il presente progetto di dottorato. Le acquisizioni dei dati utilizzati per ottimizzare il metodo di *caratterizzazione* sono state effettuate nel corso del terzo ed ultimo anno di dottorato.

⁶⁴ <https://www.nikonschool.it/experience/iso.php>

⁶⁵ <https://www.fotocomefare.com/tempo-di-esposizione/>

⁶⁶ <https://www.reflex-mania.com/cos-e-la-lunghezza-focale-un-obiettivo/>



Figura 6.3. Una delle tavole di La Venaria Reale.

Le tavole in questione rientrano in un progetto del CCR realizzato insieme all'Istituto Nazionale della Ricerca Metrologica (INRiM) ed al Laboratorio Analisi Scientifiche della Regione Autonoma Valle d'Aosta (LAS) al fine di creare una ricca banca-dati (1200 combinazioni di materiale pittorico) per studi di diagnostica nel settore dei beni culturali⁶⁷. Le tavole in questione sono tutte state preparate con soluzioni a base di colla e stucco. I diversi pigmenti stesi sono di diversa natura: 139 pigmenti inorganici, 34 tinte sintetiche e non, 4 diversi tipi di leganti, quali olio di lino, uovo, gomma arabica e PVAc [Poli(Vinil Acetato)] (Figura 6.4). Le campiture pittoriche presentano un disegno sottostante, realizzato avvalendosi o del carboncino o della sanguigna oppure di una matita o di inchiostro ferro-gallico. Sono stati applicati anche degli strati protettivi usando resina terpenica o acrilica. Il quadrante di ogni campitura è stato suddiviso in 6 parti (due colonne e tre righe): in ogni riquadro la colonna a sinistra è stata realizzata usando un legante diverso da quello a destra, mentre ogni riga è caratterizzata da un diverso tipo di strato protettivo: una delle tre righe non ha alcuna pellicola protettiva.

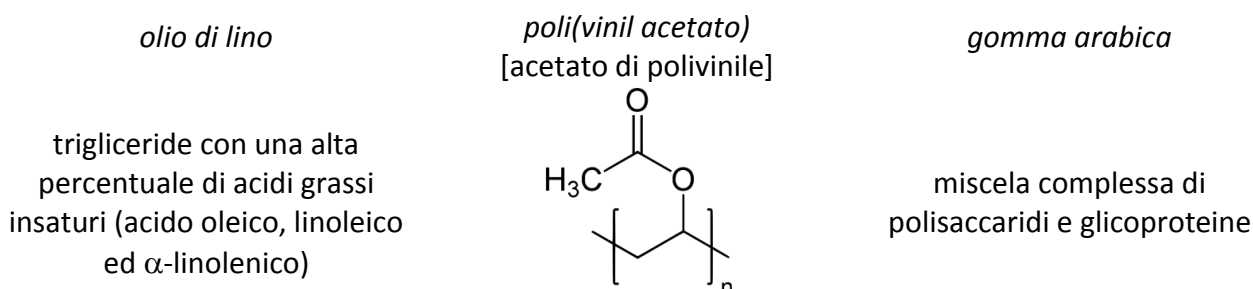


Figura 6.4. Composizione dei principali leganti utilizzati per le Tavole di Venaria Reale.

Le misure, in coerenza con la tela presso il DCCI, sono state effettuate solo su quei ritagli di campiture realizzate con la tecnica della pittura ad olio e senza strato protettivo sovrastante. Quindi sulla base di queste caratteristiche sono state scelte solo le tavole che presentavano come tecnica pittorica l'utilizzo del legante olio di lino, ossia la tavola 2, che riproduce l'età del primo

⁶⁷ file:///D:/Database%20di%20pigmenti/webimgc.inrim.it/Hyperspectral_imaging/Database.html

cristianesimo, medievale, rinascimentale e diciottesimo secolo, e la tavola 3, che invece riproduce come epoche artistiche il diciannovesimo e ventesimo secolo. Le campiture utilizzate per le misure sono elencate nella Tabella 6.4, assieme alla denominazione ed alla composizione chimica (quando rilevabile dalle schede tecniche della ditta Kremer).

Tassello ^a	Identificazione ^b	Composizione chimica ^c
1	Bianco Cremitz	$2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb(OH)}_2$
4	Carbonato di Calcio	CaCO_3
5	Nero Viticcio	Carbonio con impurezze di ioni potassio e sodio
9	Azzurrite	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2 \cdot (\text{OH})_2$
13	Smalto	$\text{K}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ con presenza di cobalto
15	Orpimento	As_4S_6
16	Realgar	As_4S_4
19	Giallo Ocra	Argilla con $\alpha\text{-FeO(OH)}$ o $\text{K,Fe(SO}_4)_2(\text{OH})_6$ o $\gamma\text{FeO(OH)}$
20	Terra di Siena	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O} + \text{MnO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$
21	Massicot Litharge	PbO
22	Terra di Siena Bruciata	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O} + \text{Al}_2\text{O}_3$ (60%) + MnO_2 (1%)
23	Rosso Umber Bruciato	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO}_2 + \text{Si} + \text{Al}_2\text{O}_3$
25	Ocra Francese	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$
28	Terra Rossa Pozzolana	Mix di terre
30	Lacca di Roggia	Di natura organica
31	Ocra Rossa	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
33	Bolla Rossa	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
34	Minio	Pb_3O_4
36	Malachite	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2 \cdot (\text{OH})_2$
40	Verde Linfa	Di natura organica
41	Verderame Sintetico	$\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$
42	Solfato di Bario	$\text{Ba(SO}_4)$
43	Seppia	NBr_9
44	Nero osso	15-20% di carbonio, 60-70% di $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$
45	Asfalto	Idrocarburi ad alto peso molecolare
46	Azzurrite sintetica	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2 \cdot (\text{OH})_2$
47	Lapislazzuli	$(\text{Na,Ca})_8(\text{AlSiO}_4)_6 + \% \text{ di ferro}$
48	Ultramarine	$\text{Na}_2\text{O}_3\text{Al}_6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{Na}_2\text{S}$
49	Giallo Piombato 1	Pb_2SnO_4
50	Ocra	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
51	Giallo Scuro di Napoli	Pb(Sb,Sn)O_3
52	Bruno di Cassel	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
53	Cannella	HgS
54	Lac Dye	<p>Acido laccaico o laccaico (lacca di cocciniglia)</p> 
55	Vermiglio	HgS
56	Rosso Testa di Morto	Fe_2O_3

57	Viola Testa di Morto	Fe_2O_3
58	Verde Terra Chiaro	Silicato a base di ferro
59	Blu di Prussia	$\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ o $\text{KFe}[\text{Fe}(\text{CN})_6] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
60	Giallo Piombato 2	$\text{Pb}(\text{Sn}, \text{Si})\text{O}_3$
61	Giallo di Napoli Parigino	$\text{Pb}(\text{Sb}, \text{Sn})\text{O}_3$
62	Rosso Veneziano	Fe_2O_3
67	Solfato di Piombo	PbSO_4
68	Bianco Litopone	$\text{BaSO}_4 + \text{ZnS}$
69	Ossido di Titanio	TiO_2
70	Bianco di Zinco	ZnO
71	Solfuro di Zinco	ZnS
72	Nero Manganese	$(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{O}_4$
73	Blu di Ploss	$(\text{CuCa})(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
74	Blu di Brema	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$
75	Ultramarine Molto Scuro	$\text{Na}_2\text{O}_3\text{Al}_6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{Na}_2\text{S}$
76	Blu di Rame	A base di rame
77	Blu Ceruleo di Zircone	Derivante dallo zircone
78	Cavansite	$\text{Ca}(\text{VO})\text{Si}_4\text{O}_{10} \cdot 4(\text{H}_2\text{O})$
79	Ultramarine Scuro	$\text{Na}_2\text{O}_3\text{Al}_6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{Na}_2\text{S}$
80	Cobalto Scuro	$(\text{Co}, \text{Zn})_2 \cdot \text{SiO}_4$
81	Cobalto Palladio	CoAl_2O_4
82	Giallo Cromo Naturale	PbCrO_4
83	Giallo Cadmio	$\text{CdS} + \text{ZnO}$
84	Giallo Permanente	Di natura organica
85	Giallo Brillante	$\text{C}_{18}\text{H}_{18}\text{N}_4\text{O}_6$
86	Giallo Studio	$\text{C}_{16}\text{H}_{12}\text{C}_{12}\text{N}_4\text{O}_4$
87	Giallo Cobalto	$2\text{K}_3(\text{Co}(\text{NO}_2)_6) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
88	Giallo Bismuto	A base di bismuto
89	Giallo Barite	BaCrO_4
90	Giallo Teatro	Di natura organica
91	Giallo Teatro Oro Sole	Di natura organica
92	Arancio Cadmio	Cd_2SSe
93	Arancio Paliotol	$\text{C}_8\text{H}_9\text{N}$
94	Arancio Paliogen	$\text{C}_{23}\text{H}_8\text{Cl}_8\text{N}_4\text{O}_2$
95	Giallo Irgazin	$\text{C}_8\text{H}_7\text{NO}$
96	Arancio d'Isoindolo	$\text{C}_8\text{H}_7\text{N}$
97	Arancio Titanio	TiO_2
98	Arancio Ossido di Ferro	$\text{FeO}(\text{OH})$
99	IWA-Enogu Slinsia	Alluminosilicati di sodio con ossidi di metalli diversi dal ferro
100	IWA-Enogu Iwamomo	
101	IWA-Enogu Usukuchi Murasaki	
102	Violetta Costa Azzurra	Fe_2O_3
103	Thioindaco	Di natura organica
104	Viola Cinquasia	Di natura organica
105	Viola Ultramarino Medio	Non identificata
106	Viola Manganese	$(\text{NH}_4)_2\text{Mn}_2(\text{P}_2\text{O}_7)$
107	Violetto Cobalto	$\text{Co}_3(\text{PO}_4)_2$
108	Garofano	$\text{Ca}(\text{Sn}, \text{Cr})\text{SiO}_5$
109	Rosso Cadmio	CdS

110	Scarlatto Irgazine	$C_6H_2N_2O_2$
111	Rosso Irgazine	Non identificata
112	Garanza d'Alizarina	Di natura organica
113	Rosso Sartorio	$Fe_2O_3 \cdot nH_2O$
114	Aegirin	$NaFeSi_2O_6$
115	Verde Andeer	granito
116	Verde Heliogen	$Cu(C_{32}N_8Cl_{14}) \cdot 16HCl$
117	Verde Ferro-Cromo	$FeCr_2O_4$
118	Verde Cobalto	Co_2SnO_4
119	Verde/Blu Cobalto	A base di cobalto
120	Verde Ossido Cromo	Cr_2O_3
121	Viridiano	$Cu_3(AsO_4)_2 \cdot 4H_2O$
122	Verde Permanente	$CoAl_2O_4$
123	Verde Cadmio chiaro	A base di cadmio
124	Verde Cadmio scuro	A base di cadmio
125	Blu Fluorescente	Non identificata
126	Blu Heliogen	$C_{32}H_{16}CuN_8$
127	Blu Reale Heliogen	$C_{32}H_{16}CuN_8$
128	Blu-Rossiccio Heliogen	Non identificata
129	Blu Idanthen	Non identificata
130	Blu Reale Heliogen	$C_{32}H_{16}CuN_8$
131	Indaco Blu Lago	Di natura organica
132	Indaco Rosso-Viola	Di natura organica
133	Blu Cielo Studio	Non identificata
134	Blu Scuro Studio	Non identificata
135	Giallo Verniciante	Gommalacca o ossido di ferro? https://www.kremer-pigmente.com/media/pdf/26120e.pdf
136	IWA-Enogu Iwabeni	Non identificata
137	Verde Heliogen giallastro	A base di rame
138	Verde Heliogen	A base di rame
A	Lacca di Roggia	Di natura organica
B	Azzurrite	$Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$
C	Lapislazzuli	$(Na,Ca)_8(AlSiO_4)_6 + \% \text{ di ferro}$
D	Resinato di rame	$Cu(CH_3CO)_2 \cdot 2Cu(OH)_2 \cdot nH_2O$
E	Bisso	Di natura organica
F	Azzurrite e giallo piombato	$Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$ e Pb_2SnO_4

^aNumero del tassello sulla tavola di "La Venaria Reale". ^bDenominazione secondo il reagentario Kremer. ^cComposizione rilevata, quando possibile, dalla scheda tecnica della ditta Kremer.

Tabella 6.4. Le 120 campiture, tra quelle realizzate sulle due tavole presso il Centro "La Venaria Reale", da me selezionate ed utilizzate (fotografate e misurate con il colorimetro) per il presente progetto di dottorato.

I pigmenti sono campioni commerciali acquistati presso la ditta Kremer e le formule si riferiscono prevalentemente, quando disponibili, a quanto riportato dall'azienda nelle relative schede. I *dataset* DRC e DRF, rispettivamente il *dataset* composto dalle misure colorimetriche e quello fotografico delle tavole di Venaria Reale, sono stati acquisiti seguendo le stesse modalità descritte per ottenere i *dataset* DGm/yC e DGm/yF. In questo caso è stata possibile solo una sessione di acquisizioni dati, ossia quella di dicembre 2018 (DRXII/18C e DRXII/18F).

Capitolo 7

La caratterizzazione del dato fotografico: stato dell'arte

7.1. Metodo X-Rite

Il metodo di *caratterizzazione* commerciale, detto anche di *bilanciamento*, consiste nell'utilizzare il plug-in scaricabile gratuitamente dal sito della ditta stessa e nell'applicarlo prima su una foto dove è rappresentata la scala colore ColorChecker Passport Photo e, successivamente, sulle foto realizzate nella stessa sessione fotografica. Il metodo X-Rite è solo un esempio dei diversi metodi commerciali esistenti sul mercato.

7.2. Metodo "polinomiale"

Il metodo di *caratterizzazione* più utilizzato in letteratura propone una regressione lineare multivariata basata su matrice polinomiale per individuare i coefficienti predittivi o correttivi⁶⁸.

L'equazione 7.1 si riferisce alla matrice polinomiale quadratica (denominata nel seguito "**p10**") proposta da Leon *et al.*⁶⁹:

$$\begin{bmatrix} L^* \\ a^* \\ b^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{1,1} & M_{1,2} & M_{1,3} & M_{1,4} & M_{1,5} & M_{1,6} & M_{1,7} & M_{1,8} & M_{1,9} & M_{1,10} \\ M_{2,1} & M_{2,2} & M_{2,3} & M_{2,4} & M_{2,5} & M_{2,6} & M_{2,7} & M_{2,8} & M_{2,9} & M_{2,10} \\ M_{3,1} & M_{3,2} & M_{3,3} & M_{3,4} & M_{3,5} & M_{3,6} & M_{3,7} & M_{3,8} & M_{3,9} & M_{3,10} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \\ R \times G \\ R \times B \\ G \times B \\ R^2 \\ G^2 \\ B^2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

↑
Vettore di riferimento
(vettore target)
↑
Matrice correttiva
↑
Vettore degli input

Il *vettore target* (definito anche "di riferimento") descrive le misure acquisite con il colorimetro, il *vettore degli input* è costituito dai valori fotografici nei canali R, G, B. Avendo a disposizione per l'addestramento (*training*) un insieme di N elementi colorati di cui siano noti la misura colorimetrica e il dato fotografico, la matrice correttiva può essere identificata sulla base del criterio dei minimi quadrati.

⁶⁸ Hong G., Ronnier Luo M., Rhodes P.A., *A study of Digital Camera Colorimetric Characterization Based on Polynomial Modelling*, Color Research and Application, 2000. Hong G., Luo M.R., Rhodes P.A., *A study of digital camera colorimetric, characterization based on polynomial modelling*, Color Research and Application, 2001, p.76-84.

⁶⁹ Leon K., Mey D., Pedreschi F., Leon J., *Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images*, Food Research International, 2006.

Si definisce “y” il vettore target contenente le componenti L* di ogni misura colorimetrica acquisita:

$$y = [L^*_1 \dots \dots L^*_N]^T \quad (7.2)$$

A partire dal dato fotografico dei corrispondenti N elementi si costruisce la matrice (X) degli input:

$$X = \begin{bmatrix} R_1 & G_1 & B_1 & R_1 \times G_1 & R_1 \times B_1 & G_1 \times B_1 & R_1^2 & G_1^2 & B_1^2 & 1 \\ : & : & : & : & : & : & : & : & : & : \\ R_N & G_N & B_N & R_N \times G_N & R_N \times B_N & G_N \times B_N & R_N^2 & G_N^2 & B_N^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.3)$$

Le righe della matrice correttiva vengono calcolate come consigliato da Leon *et al.* A titolo esemplificativo, definendo θ_{L^*} la prima riga della detta matrice:

$$\theta_{L^*} = [M_{1,1} \ M_{1,2} \ M_{1,3} \ M_{1,4} \ M_{1,5} \ M_{1,6} \ M_{1,7} \ M_{1,8} \ M_{1,9} \ M_{1,10}]^T \quad (7.4)$$

essa si ricava tramite pseudo-inversa come segue:

$$\theta_{L^*} = [X^T X]^{-1} X^T y \quad (7.5)$$

e il valore predetto del dato fotografico in riferimento alla componente L* è:

$$\hat{y} = X \theta_{L^*} \quad (7.6)$$

La stessa procedura viene usata per calcolare le altre righe della matrice in riferimento alle due componenti colorimetriche a* e b*.

Precedentemente al lavoro di Leon, Hong *et al.*⁷⁰, proponendo il metodo polinomiale, confrontano polinomi di vari ordini giungendo alla conclusione che, per la specifica applicazione nell’ambito alimentare, la presenza del termine prodotto dei tre canali (RxGxB) e del termine unitario sono fondamentali per le prestazioni della regressione: in conclusione gli A.A. utilizzano, come migliore soluzione adottabile, un polinomio composto da 11 termini, “**p11**” (eq. 7.7), che considera anche il prodotto RxGxB in aggiunta ai termini quadratici:

$$R \ G \ B \ R \times G \ R \times B \ G \times B \ R^2 \ G^2 \ B^2 \ R \times G \times B \ 1 \quad (7.7)$$

7.3. Metodo della correzione gamma

Per migliorare il metodo proposto da Hong, un approccio pubblicato in letteratura propone di considerare la *correzione gamma* prima dell’identificazione della matrice correttiva^{71,72}.

In una foto digitale, il colore è il risultato del processo di rielaborazione di quanto viene registrato dalla macchina fotografica: l’intensità della luce riflessa dall’oggetto, registrata dal

⁷⁰ Hong G., Ronnier Luo M., Rhodes P.A., *A study of Digital Camera Colorimetric Characterization Based on Polynomial Modelling*, Color Research and Application, 2000. Hong G., Luo M.R., Rhodes P.A., *A study of digital camera colorimetric, characterization based on polynomial modelling*, Color Research and Application, 2001, p.76-84.

⁷¹ Cheung V., Westland S., Thomson M., *Accurate Estimation of the nonlinearity of Input/Output Response for Color Cameras*, Color Research and application, 2004, pp. 406-412.

⁷² Valous N.A., Mendoza F., Sun D.W., Allen P., *Colour calibration of a laboratory computer vision system for quality evaluation of pre-slides hams*. Meat Science 81, 132-141 (2009).

fotosensore ed elaborata dal sistema digitale, viene interpretata in chiave non lineare di un fattore γ^{73} , per cui l'intensità percepibile guardando le foto risulta più brillante rispetto alla realtà.

Se chiamiamo R, G, B i valori registrati dal fotosensore della macchina fotografica e R', G', B' i corrispettivi valori di output, nel caso di correzione gamma delle non linearità (cf. Paragrafo 3.2) è possibile scrivere le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} R' &= R^\gamma \\ G' &= G^\gamma \\ B' &= B^\gamma \end{aligned} \tag{7.8}$$

A partire dal *training set* si considera un sotto-insieme di elementi di colore neutro (grigio), descritti dai valori R_g, G_g, B_g dove $R_g = G_g = B_g$.

Nel sistema di riferimento XYZ, per tali elementi è inoltre possibile scrivere:

$$\begin{array}{ccc} R_g = Y_g & & R'_g = Y_g^\gamma \\ G_g = Y_g & \longrightarrow & G'_g = Y_g^\gamma \\ B_g = Y_g & & B'_g = Y_g^\gamma \end{array} \tag{7.9}$$

dove Y_g indica la luminanza. Il fattore γ viene quindi stimato considerando come:

$$\begin{aligned} \gamma &= \log_{Y_g} R'_g \\ \gamma &= \log_{Y_g} G'_g \\ \gamma &= \log_{Y_g} B'_g \end{aligned} \tag{7.10}$$

dove con Y_g si indica la luminanza del medesimo tassello grigio descritto dalle componenti R_g, G_g e B_g , mentre con R'_g, G'_g e B'_g si mostrano gli output delle foto che raffigurano il medesimo tassello.

⁷³ Cheung T.L.V., Westland S., *Accurate Estimation of the nonlinearity of Input/Output Response for Color Digital Cameras*, IS & T's 2003 PICS Conference.

Capitolo 8

La caratterizzazione del dato fotografico per i beni culturali

Nonostante l'esistenza di software commerciali che automaticamente correggono (cioè *bilanciano*) la qualità del colore di una foto digitale (ad esempio secondo il gusto personale del fotografo), un processo, più complesso, di *caratterizzazione* della fotocamera si rende necessario per una correzione quantitativa "oggettiva" del colore (indubbiamente richiesta nell'ambito dei beni culturali) che lo assimili al dato colorimetrico. L'insufficienza del software commerciale a raggiungere tramite *bilanciamento* questo risultato è stata verificata anche sui *dataset* utilizzati nel presente progetto di ricerca (Appendice A).

Nel seguito viene illustrata l'applicazione ai *dataset* di interesse (Capitolo 6) dei metodi di *caratterizzazione* tratti dalla letteratura e descritti nel Capitolo 7, verificando e confrontando le prestazioni ottenute.

Per l'identificazione del modello ogni metodo viene *addestrato* su un campione, detto *training set*, che usa come riferimento i dati acquisiti dal colorimetro (realtà al suolo o *ground truth*) per ogni dato fotografico. Successivamente, per la valutazione della bontà del metodo, il modello viene applicato per la correzione del dato fotografico e l'errore (distanza colorimetrica) medio, $\Delta E_{00\text{medio}}$, (Paragrafo 2.2.1) viene calcolato come la distanza tra il valore ottenuto tramite la *caratterizzazione* e il valore di riferimento colorimetrico.

La valutazione riguarda l'applicazione della procedura di correzione *a)* allo stesso insieme usato per il *training set* così come *b)* ad insiemi diversi di coloriture (*test set*), come definito di volta in volta. Mentre la valutazione sul *training set* è un indice della precisione del modello, la valutazione sul *test set* fornisce indicazioni sulla sua abilità di generalizzazione (*robustezza*): un ottimo risultato derivante dalla prima valutazione, associato ad un alto valore di ΔE derivante dalla seconda potrebbe essere sintomo di un problema di *overfitting*, ovvero di un modello che si adatta perfettamente al *training set* ma non ha capacità di inferenza (generalizzazione), mancando cioè in "*robustezza*".

Sulla base delle misure standard di distanza tra colori, pur esistendo diverse metriche per il calcolo generalmente si ritiene che un valore di ΔE pari a 1 sia il minimo percettibile nei test di laboratorio, considerando che, in normali condizioni di luce ambientale, è difficile percepire differenze inferiori a 1,5. Un valore considerato più che accettabile è ΔE pari a 2. Nello specifico, per il processo di stampa tipografica un valore compreso fra 3 e 5 è considerato adeguato.

A seguito dell'applicazione dei metodi di letteratura, sulla base dei risultati ottenuti verrà proposto un nuovo metodo (in seguito denominato "originale") relativamente più semplice, che tiene in diversa considerazione le correlazioni esistenti tra componenti di luminanza e cromatiche delle misure di interesse e vincola il risultato della correzione ad avvicinarsi in precisione ai valori del colorimetro.

Le prestazioni del metodo originale verranno infine confrontate con quelle dei metodi già noti.

8.1. Caratterizzazione con i metodi di letteratura

Nel seguito viene descritta l'applicazione dei metodi classici di *caratterizzazione* (Capitolo 7) ai pigmenti dei *dataset* descritti nel Capitolo 6.

8.1.1. Metodo di caratterizzazione “polinomiale”

La prima matrice polinomiale stimata è stata il modello quadratico “**p10**”⁷⁴ (eq. 7.1), usando come *training set* la scala colore ColorChecker Passport Photo X-Rite (DXC2 con DXF1).

Per un riscontro visivo sulla bontà della *caratterizzazione*, i dati colorimetrici originali e i corrispettivi dati fotografici *caratterizzati* sono stati convertiti dallo spazio CIELab allo spazio RGB (secondo le formule riportate in APPENDICE B), per poterli visualizzare nello spazio RGB mediante il software Fiji.

In alcuni casi, il confronto visivo sembra mostrare una buona corrispondenza tra colorimetria e *caratterizzazione* fotografica, come nel caso del tassello giallo (Figura 8.1a). Nel caso del bianco (Figura 8.1b) la corrispondenza è meno precisa. Mediamente, il valore di distanza ($\Delta E_{00(\text{medio})} = 4,66 \pm 3,31$) è piuttosto alto, come riportato in Tabella 8.1.

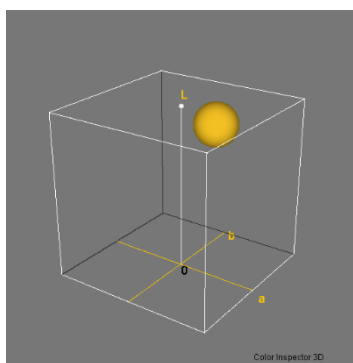


Figura 8.1a: Il giallo (tassello 10 della “scala colore X-Rite”): confronto dato colorimetrico/dato fotografico caratterizzato.

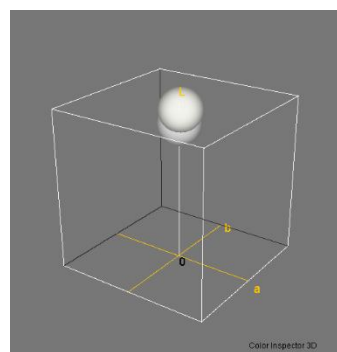


Figura 8.1b: Il bianco (tassello 1 della “scala colore X-Rite”): confronto dato colorimetrico/dato fotografico caratterizzato.

Applicando allo stesso *training set* il polinomio “**p11**” (eq. 7.7) la distanza media, $\Delta E_{00(\text{medio})} = 3,01 \pm 1,77$, risulta decisamente inferiore e meno dispersa (deviazione standard più bassa) (Tabella 8.1).

<i>Training set DX</i>	$\Delta E_{00(\text{medio})}$
Modello quadratico p10	$4,66 \pm 3,31$
Modello polinomiale p11	$3,01 \pm 1,77$

Tabella 8.1. Media delle differenze colorimetriche ($\Delta E_{00(\text{medio})}$) tra i dati fotografici caratterizzati e i corrispettivi di riferimento del training set secondo il metodo quadratico (**p10**) o polinomiale (**p11**). “DX” indica il dataset X-Rite, nel confronto (*caratterizzazione*) tra acquisizione colorimetrica e acquisizione fotografica.

⁷⁴ Leon K., Mey D., Pedreschi F., Leon J., *Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images*, Food Research International, 2006.

Sulla base del confronto tra metodo quadratico e polinomiale, il modello ottenuto con quest'ultimo approccio è stato applicato alle misure delle 30 campiture su tela effettuate a gennaio 2018 (DGI/18), utilizzate come *test set*, ma il valore di distanza medio risulta molto alto ($19,20 \pm 4,92$).

Il modello polinomiale **p11** stimato sul *training set* composto dalle 30 campiture della tela misurate a marzo 2018 (DGIII/18) è stato quindi applicato al *test set* costituito dalle medesime campiture misurate ad aprile 2018 (DGIV/18) (Tabella 8.2). Come si evince dall'esame della tabella, la robustezza è migliorata ($\Delta E_{00(\text{medio})} = 7,90 \pm 5,34$) pur rimanendo significativa la differenza colorimetrica.

Modello polinomiale p11	$\Delta E_{00(\text{medio})}$
Training set (tela/misure di marzo 2018) DGIII/18	$1,10 \pm 0,66$
Test set (tela/misure di aprile 2018) DGIV/18	$7,90 \pm 5,34$

Tabella 8.2. Media delle differenze colorimetriche tra i dati colorimetrici e i corrispettivi fotografici caratterizzati con il metodo polinomiale definito sul training set composto dalle misure delle campiture della tela di marzo 2018.

E' stato pertanto effettuato un altro tentativo utilizzando un *training set* più ampio, rappresentato dalle 30 campiture sulla tela misurate nel mese di marzo 2018 (DGIII/18) assieme ai 24 tasselli della *scala colore* (DX). La robustezza di questo metodo è stata valutata sul *test set* composto, anche in questo caso, ai fini di un confronto significativo con il test di Tabella 8.2, dalle misure delle 30 campiture della tela misurate ad aprile 2018 (DGIV/18). I dati di Tabella 8.3 mostrano chiaramente come questa modifica abbia comportato un deciso peggioramento nella precisione del metodo, a fronte di una robustezza praticamente invariata.

Modello polinomiale p11	$\Delta E_{00(\text{medio})}$
Training set (tela/misure di marzo 2018 + tasselli scala colore) DGIII/18+DX	$3,86 \pm 2,26$
Test set (tela/misure di aprile 2018) DGIV/18	$7,89 \pm 4,44$

Tabella 8.3. Media delle differenze colorimetriche tra i dati colorimetrici e i corrispettivi fotografici caratterizzati con il metodo polinomiale definito sul training set composto dalle misure sui 24 tasselli della scala colore e dalle 30 campiture della tela di marzo 2018.

In letteratura diversi sono i report che suggeriscono modifiche al metodo polinomiale; c'è chi ha suggerito di applicare una radice alla K^{75} e chi di cambiare (aumentando o diminuendo) il numero di termini dello sviluppo polinomiale⁷⁶. Alla base di questi studi vi è ovviamente il presupposto che per svolgere una buona regressione multivariata è necessario costruire un modello che abbia il numero idoneo di termini per descrivere il sistema in esame nella sua completezza e complessità. E' infatti noto che, all'aumentare del numero dei termini polinomiali il *training set* deve aumentare in proporzione la taglia del campione.

⁷⁵ Finlayson G.D., Mackiewicz M., Hulbert A., *Color Correction Using Root-Polynomial Regression*, IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING, 2015.

⁷⁶ Valous N., Su D.-W., *Colour calibration of a laboratory computer vision system for quality evaluation of pre-sliced hams*, Meat Science, 2009.

Modelli polinomiali a 5 e a 35 termini (p5_p35)

Per valutare la bontà dell'ordine polinomiale si confronta **p11** con **p5** (eq. 8.1) e **p35** (eq. 8.2).

$$\mathbf{p5}: 1 \ R \ G \ B \ R \times G \times B \quad (8.1)$$

$$\mathbf{p35}: R \ G \ B \ R \times G \ R \times B \ G \times B \ R^2 \ G^2 \ B^2 \ R^3 \ G^3 \ B^3 \ R^4 \ G^4 \ B^4 \ R^5 \ G^5 \ B^5 \ R^6 \ G^6 \ B^6 \ R^7 \ G^7 \ B^7 \ R^8 \ G^8 \ B^8 \ R^9 \ G^9 \ B^9 \ R^{10} \ G^{10} \ B^{10} \ R \times B \times G \ 1 \quad (8.2)$$

In questo caso, *training set* sono le 120 campiture stese con la tecnica della pittura ad olio sulle due tavole preparate presso il Centro per la Conservazione e il Restauro dei Beni Culturali “La Venaria Reale”, le cui misure sono state acquisite nel dicembre 2018 (DRXII/18) (Tabella 8.4). La robustezza dei due modelli, nel confronto con il modello **p11**, è stata valutata sul *test set* rappresentato dalle 30 campiture della tela presso il DCCI misurate a marzo 2018 (DGIII/18) (Tabella 8.5). Come si può notare, pur avendo aumentato i termini del polinomio, non si ottiene alcun valido risultato.

<i>Training set: DRXII/18</i>	$\Delta E_{00}(\text{medio})$
Modello polinomiale p5	7,43±4,51
Modello polinomiale p11	5,89±3,65
Modello polinomiale p35	7,90±5,34

Tabella 8.4. Media delle differenze colorimetriche tra dati colorimetrici e corrispettivi fotografici caratterizzati. Il training set è costituito dalle misure sulle campiture delle 2 tavole del Centro “La Venaria Reale”.

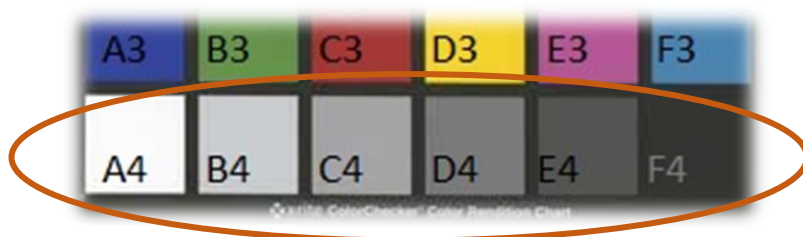
<i>Test set: DGIII/18</i>	$\Delta E_{00}(\text{medio})$
Modello polinomiale p5	8,41±2,88
Modello polinomiale p11	10,24±2,92
Modello polinomiale p35	10,35±2,61

Tabella 8.5. Media delle differenze colorimetriche tra dati colorimetrici e corrispettivi fotografici caratterizzati. Il set usato è il test set composto dalle 30 misure sulle campiture costituenti la tela presso il DCCI e misurate a marzo 2018.

Tra i tre modelli applicati, quello di ordine 11 raggiunge la migliore specializzazione, mentre quello con il semplice sviluppo di 5 termini (**p5**) fornisce la migliore generalizzazione ed è stato pertanto utilizzato prevalentemente negli studi successivi, anche come confronto con il metodo originale sviluppato nell'ambito del progetto Paragrafo 8.2).

8.1.2. Metodo di caratterizzazione secondo correzione gamma

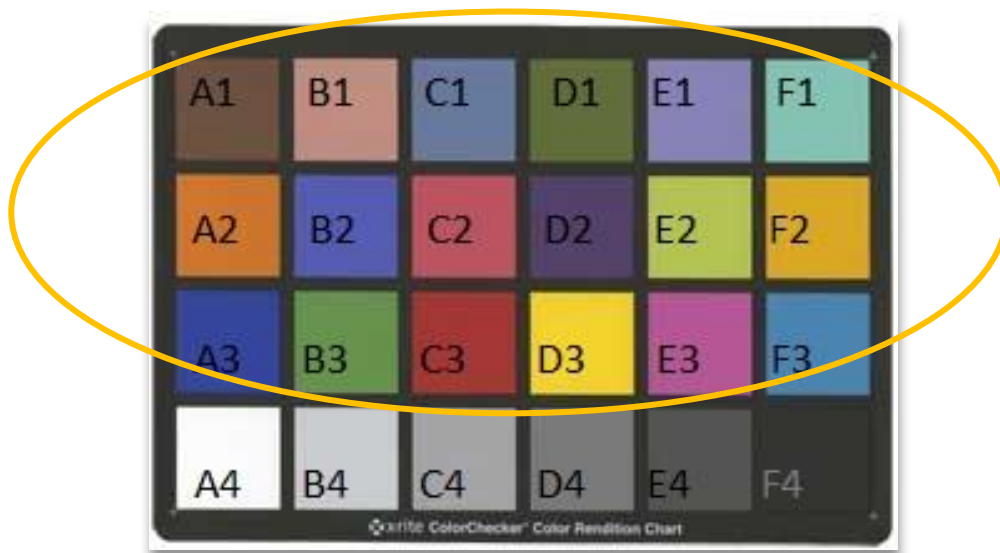
Per applicare il metodo che introduce la stima e la correzione del fattore gamma (cf. Paragrafo 7.3), sono stati presi in considerazione i soli tasselli del grigio (A4, B4, C4, D4, E4 e F4) del ColorChecker Passport Photo X-Rite.



Il fattore γ' è stato stimato con la media dei singoli γ ottenuti dai tre canali di ognuno dei sei tasselli del grigio, calcolando poi una media totale dei valori γ' per identificare il fattore $\gamma_{globale}$. I valori dell'output fotografico sono stati corretti mediante la radice gamma su ogni canale:

$$C' = C^{\frac{1}{\gamma_{globale}}} \quad (8.3)$$

dove C' rappresenta uno dei canali R' , G' , B' .



Successivamente, come suggerito in letteratura, è stato applicato il modello polinomiale **p11**.

La matrice correttiva è stata definita utilizzando come *training set* le misure (**DX**) di tutti i 24 tasselli componenti la scala colore o, per confronto, le misure dei 18 tasselli colorati (i 24 tasselli meno i 6 grigi). Le due matrici così definite forniscono, sul *training set*, risultati poco dissimili, con valori di $\Delta E_{00(\text{medio})}$ affini (Tabella 8.6a) ma diversi indici di Pearson: più prossimo a 1 nel caso in cui la matrice sia stata costruita sul “Vettore dei dati fotografici” composto dai valori C' (Tabella 8.6b).

<i>Training set</i>	$\Delta E_{00(\text{medio})}$
DX (24 tasselli)	$2,87 \pm 2,31$
DX (18 tasselli)	$2,11 \pm 2,03$

Tabella 8.6a. Media delle differenze colorimetriche tra dati colorimetrici e corrispettivi fotografici corretti con le due varianti del secondo metodo tratto dalla letteratura (correzione gamma).

<i>Training Set</i>	L^*	a^*	b^*
DX (24 tasselli)	0,992094	0,986495	0,996842
DX (18 tasselli)	0,997609	0,989542	0,99809

Tabella 8.6b. Indici di Pearson tra i dati colorimetrici e corrispettivi fotografici corretti con le due varianti del secondo metodo tratto dalla letteratura (correzione gamma).

I modelli così definiti sono stati applicati sul *test set* DGIII/18. Entrambi i modelli non forniscono prestazioni migliorative rispetto all'applicazione diretta della matrice (Tabella 8.7).

Test set: DGIII/18	$\Delta E_{00}(\text{medio})$
Metodo "24 tasselli" ^a	8,86 ± 4,31
Metodo "18 tasselli" ^b	9,77 ± 6,25

^aQuesto metodo è stato costruito sul *training set* costituito da tutti i tasselli componenti la scala colore.

^bQuesto metodo è stato costruito sul *training set* costituito da tutti i tasselli della scala colore meno i grigi.

Tabella 8.7. Media delle differenze colorimetriche tra dati colorimetrici e corrispettivi digitali corretti con le due varianti del secondo metodo tratto dalla letteratura.

Durante il terzo ed ultimo anno di dottorato è stato effettuato qualche tentativo di *caratterizzazione* utilizzando questo metodo ma i risultati sono sempre stati poco soddisfacenti. In Tabella 8.8 sono riportati i risultati ottenuti applicando questo metodo utilizzando come *training set* le 2 tavole del Centro "La Venaria Reale" e come *test set* le 30 misure delle campiture sulla tela presso il DCCI e misurate nel mese di dicembre 2018. In particolare, questi dati sono stati corretti dal fattore gamma, γ_{globale} , calcolato come sopra descritto, e poi è stata applicata una matrice a sviluppo polinomiale di 20 termini (eq. 8.4).

$$\text{p20: } R \ G \ B \ R \times G \ R \times B \ G \times B \ R^2 \ G^2 \ B^2 \ R^3 \ G^3 \ B^3 \ R^4 \ G^4 \ B^4 \ R^5 \ G^5 \ B^5 \ R \times B \times G \ 1 \quad (8.4)$$

	$\Delta E_{00}(\text{medio})$
Training set DR	6,42 ± 3,99
Test set DGXII/18	11,94 ± 4,44

Tabella 8.8. Media delle differenze colorimetriche tra dati colorimetrici e corrispettivi digitali corretti con il secondo metodo tratto dalla letteratura, dove la matrice correttiva è stata costruita con uno sviluppo polinomiale di 20 termini (p20).

8.2. Metodo originale elaborato durante il dottorato

Durante il secondo anno di dottorato sono stati fatti alcuni preliminari studi statistici sui *dataset* DX e DGIII/18 contenenti, rispettivamente, le misure dei 24 tasselli della scala colore ColorChecker Passport Photo della ditta X-Rite e le 30 campiture della tela presso DCCI misurate nel mese di marzo 2018. Nei grafici di Figure 8.2, 8.3, 8.4 in giallo sono indicati i dati relativi ai tasselli della scala colore, in blu quelli delle campiture su tela. I grafici suggeriscono un'ottima correlazione tra dati digitali e fotografici, come testimoniato dai coefficienti di Pearson di Tabella 8.9, specialmente per quanto riguarda la componente di luminanza.

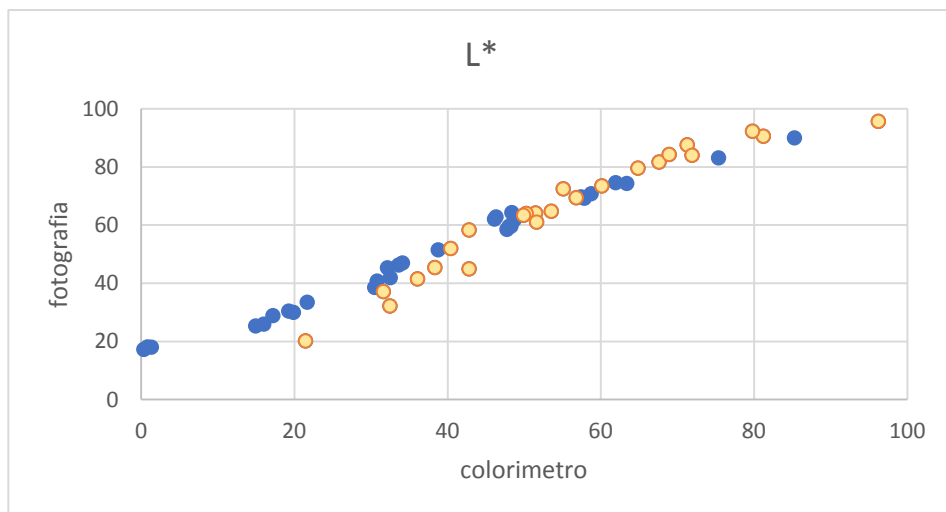


Figura 8.2. Correlazione tra le componenti L^* dei dati colorimetrici e dei rispettivi dati fotografici, senza calibrazione e caratterizzazione. **DX** in giallo e **DGIII/18** in blu.

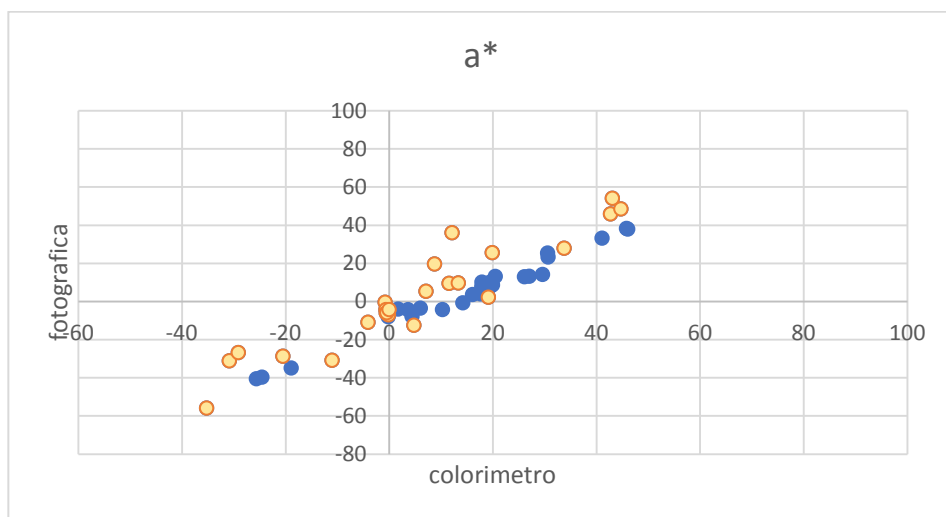


Figura 8.3. Correlazione tra le componenti a^* dei dati colorimetrici e dei rispettivi dati fotografici, senza calibrazione e caratterizzazione. **DX** in giallo e **DGIII/18** in blu.

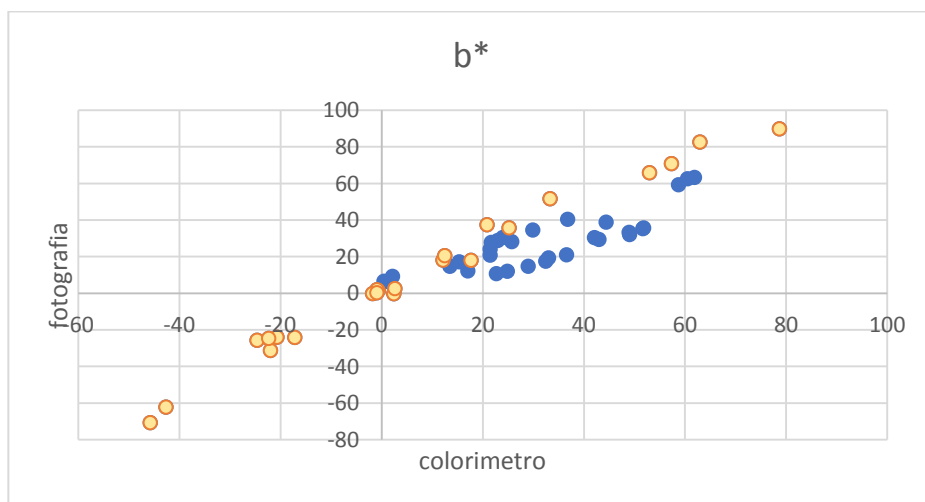


Figura 8.4. Correlazione tra le componenti b^* dei dati colorimetrici e dei rispettivi dati fotografici, senza calibrazione e caratterizzazione. **DX** in giallo e **DGIII/18** in blu.

r_{L^*}	r_{a^*}	r_{b^*}
0,97971	0,93724	0,94536

Tabella 8.9. Coefficienti di Pearson per le correlazioni delle componenti colorimetriche L^* , a^* e b^* tra i dati colorimetrici e i relativi fotografici delle misure relative sia alla scala colore che alla tela del DCCI (misurata a marzo 2018). **Dataset: DX + DGIII/18.**

Non sono stati rilevati né *outlier* né errori sistematici, la cui individuazione e correzione potrebbe consentire di migliorare la *caratterizzazione*. Anche valutando le correlazioni tra i dati colorimetrici e quelli caratterizzati con lo sviluppo polinomiale a 11 termini non sono stati individuati errori sistematici, ma una buona correlazione e *caratterizzazione* (Figura 8.5 e Tabella 8.10), che aumenta sensibilmente rispetto ai dati originali.

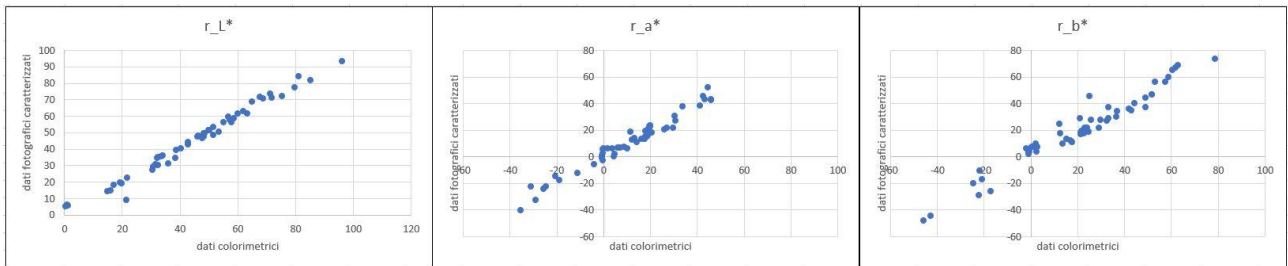


Figura 8.5. Correlazioni rispettivamente della componente L^* , a^* e b^* tra i dati colorimetrici e corrispettivi fotografici caratterizzati con sviluppo a 11 termini (eq. 7.7). **Dataset: DX e DGIII/18.**

r_{L^*}	r_{a^*}	r_{b^*}
0,991164	0,983288	0,973464

Tabella 8.10. Coefficienti di Pearson per le correlazioni delle componenti colorimetriche L^* , a^* e b^* tra i dati colorimetrici e relativi fotografici caratterizzati con sviluppo polinomiale a 11 termini (eq. 7.7) delle misure relative sia alla scala colore che alla tela del DCCI (misurata a marzo 2018). **Dataset: DX + DGIII/18.**

Sulla base di questi ultimi grafici, si è deciso di compiere una regressione lineare semplice applicata ad ogni componente colorimetrica (L^* , a^* , b^*):

$$\begin{aligned} L_p &= \alpha_L \times L_s + \beta_L \\ a_p &= \alpha_a \times a_s + \beta_a \\ b_p &= \alpha_b \times b_s + \beta_b \end{aligned} \quad (8.5)$$

dove L_p, a_p, b_p sono le componenti colorimetriche in riferimento ai dati fotografici non corretti, L_s, a_s, b_s sono le componenti tristimolo in riferimento ai dati colorimetrici, (α_L, β_L) , (α_a, β_a) e (α_b, β_b) sono i coefficienti delle regressioni: α rappresenta la pendenza della retta di regressione e β , l'intercetta. In termini di modifica dell'immagine fotografica, tali parametri rappresentano gli errori sistematici da correggere per la corretta *calibrazione* della retta.

Definendo L_c, a_c, b_c le componenti fotografiche corrette, considerando il vincolo derivante dal fatto che i dati fotografici corretti devono essere equivalenti a quelli colorimetrici, ossia:

$$L_c = L_s \quad a_c = a_s \quad b_c = b_s \quad (8.6)$$

si propone di applicare un primo passo di *caratterizzazione* sulla base dei parametri della regressione:

$$\begin{aligned} L_c &= \frac{L_p - \beta_L}{\alpha_L} \\ a_c &= \frac{a_p - \beta_a}{\alpha_a} \\ b_c &= \frac{b_p - \beta_b}{\alpha_b} \end{aligned} \quad (8.7)$$

I grafici a seguire (Figure 8.6, 8.7, 8.8) illustrano in arancione i dati colorimetrici e i corrispettivi fotografici corretti con le equazioni sopra descritte, mentre in blu sono indicati i dati colorimetrici e i corrispettivi fotografici originali non corretti. Dal grafico in Figura 8.9 si ottiene una prima stima sommaria della correlazione sulla componente b^* .

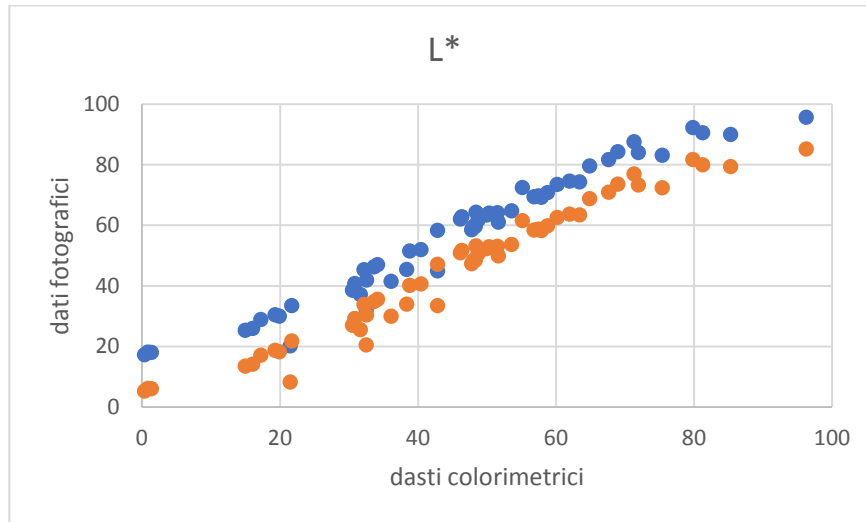


Figura 8.6. Correlazione tra L^* del colorimetro e L^* delle foto corrette.

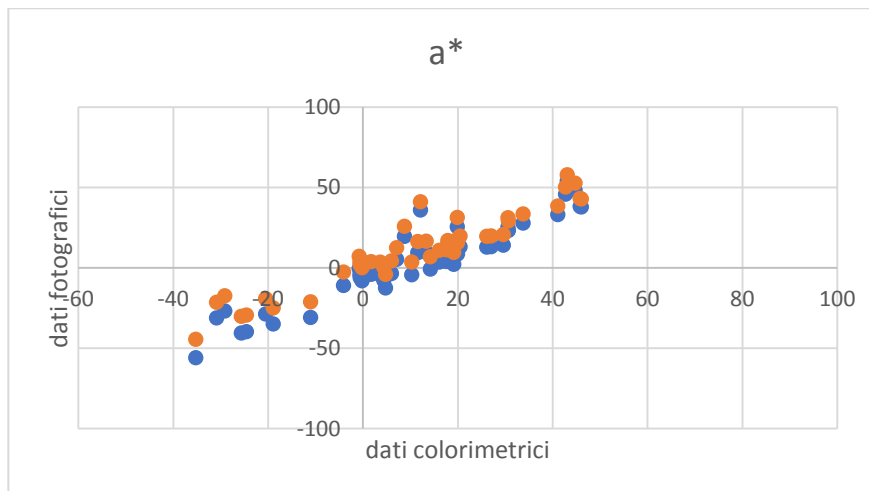


Figura 8.7. Correlazione tra a^* del colorimetro e a^* delle foto corrette.

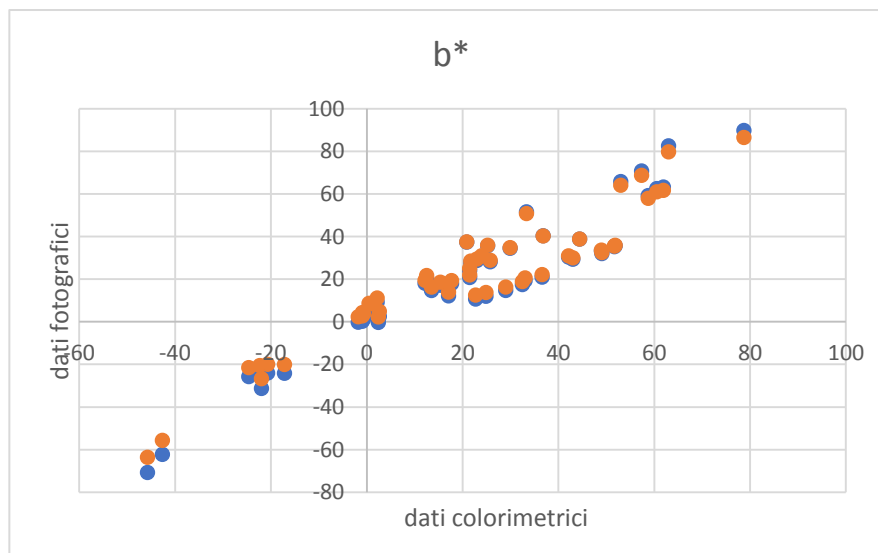


Figura 8.8. Correlazione tra b^* del colorimetro e b^* delle foto corrette.

Essendo poco soddisfacenti i risultati ottenuti sulla componente b^* , si è deciso di valutare la correlazione esistente tra a^* e b^* e di applicare una regressione lineare multivariata, tramite la matrice polinomiale con sviluppo a 11 termini, per migliorare la correlazione esistente tra le b^* del colorimetro e le b^* della macchina fotografica.

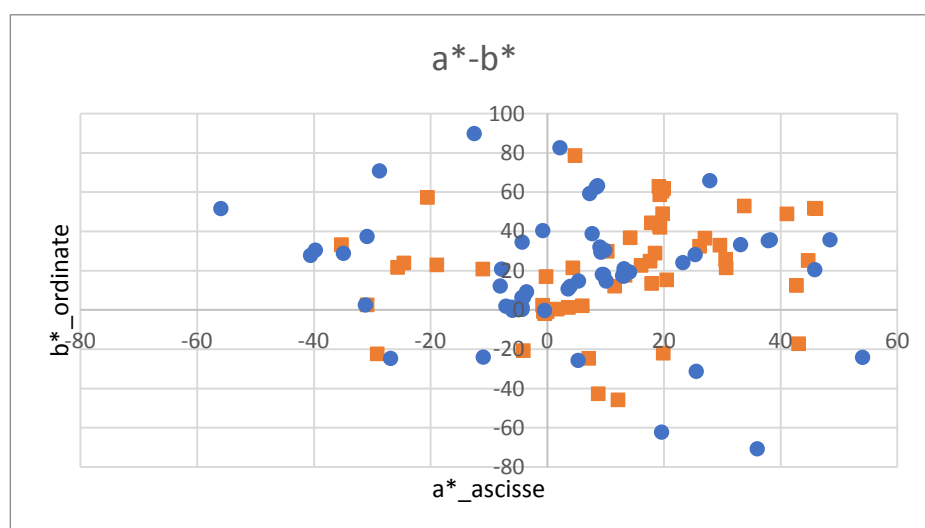


Figura 8.9. Correlazione tra a^* e b^* dei dati colorimetrici (in arancione) e corrispettivi fotografici non corretti (in blu). **DX e DGIII/18.**

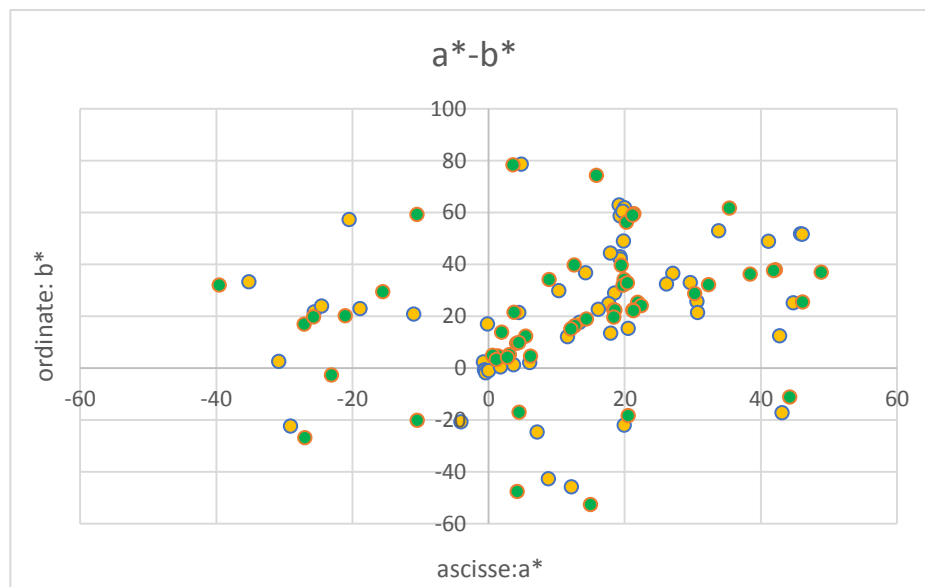


Figura 8.10. Correlazione tra a^* e b^* dei dati colorimetrici (in giallo) e corrispettivi fotografici corretti con matrice polinomiale (in verde).

Sulla base di queste valutazioni, tenendo conto che nello studio del colore le tre componenti sono sempre indipendenti, e considerando il diverso contributo informativo del parametro di luminanza L^* rispetto alle componenti cromatiche, si propone di applicare un metodo di *caratterizzazione* diversificato: per la componente di luminanza si applica il modello di regressione vincolato (eq. 8.7), mentre per le componenti a^* e b^* si applica il modello di regressione polinomiale a 11 termini (**p11**).

Il nuovo metodo correttivo così individuato, definito originale o “vincolato”, riesce a conglobare le operazioni di *calibrazione* e *caratterizzazione* in una unica procedura.

I risultati ottenuti dal nuovo metodo sono stati confrontati con i risultati ottenuti applicando i metodi tratti dalla letteratura, descritti al paragrafo 8.1.

Per quanto riguarda l’analisi dei coefficienti di correlazione di Pearson, la valutazione della *caratterizzazione* sullo stesso test di *training* indica che il miglior risultato è quello ottenuto dal metodo della correzione gamma (Tabella 8.11).

Viceversa, per quanto riguarda un *test set* diverso dal *training* (in questo caso DGIV/18) si evince come il metodo gamma sia poco efficace, mentre il metodo originale presenta complessivamente le migliori prestazioni, dimostrando la sua capacità nella generalizzazione della procedura e quindi una buona applicabilità nei casi reali di studio (Tabella 8.12).

Training set: DX + DGIII/18	r_{L^*}	r_{a^*}	r_{b^*}
Dati originali non corretti (Tab. 8.9)	0,9797	0,9372	0,9453
Metodo originale	0,9797	0,9833	0,9596
Metodo polinomiale p11 (Tab. 8.10)	0,9912	0,9833	0,9735
Correzione gamma (Tab. 8.6b)	0,9976	0,9895	0,9981

Tabella 8.11. Coefficienti di Pearson tra dati colorimetrici e corrispettivi fotografici corretti con i diversi metodi caratterizzanti.

Test set: DGIV/18	r_L*	r_a*	r_b*
Metodo originale	0,9752	0,9772	0,9125
Metodo polinomiale p11	0,9743	0,9651	0,9601
Correzione gamma	0,9111	0,9112	0,6464

Tabella 8.12. Coefficienti di Pearson tra dati colorimetrici e corrispettivi fotografici corretti con i diversi metodi caratterizzanti.

Alle stesse conclusioni si giunge analizzando le differenze colorimetriche $\Delta E_{00(\text{medio})}$ tra i dati colorimetrici e i corrispettivi fotografici *caratterizzati* con il metodo originale, con il “semplice” modello polinomiale a 11 termini e con il metodo della correzione gamma, sia per il *training set* che per il *test set*, come riportato in Tabella 8.13 e visualizzato in Figura 8.11.

Metodo	Training set	$\Delta E_{00(\text{medio})}$
Metodo originale	<i>DX + DGIII/18</i>	4,78 ± 2,54
Metodo polinomiale p11	<i>DX + DGIII/18</i>	3,87 ± 2,26
Correzione gamma	<i>DX “24 tasselli”</i> (Tab. 8.6a)	2,87 ± 2,31

Metodo	Test set:	$\Delta E_{00(\text{medio})}$
Metodo originale	<i>DGIV/18</i>	7,32 ± 3,45
Metodo polinomiale p11	<i>DGIV/18</i>	7,89 ± 4,44
Correzione gamma	<i>DGIII/18</i> (Tab. 8.7)	8,86 ± 4,31

Tabella 8.13. Media delle differenze colorimetriche tra i dati colorimetrici e corrispettivi fotografici corretti secondo i diversi modelli.

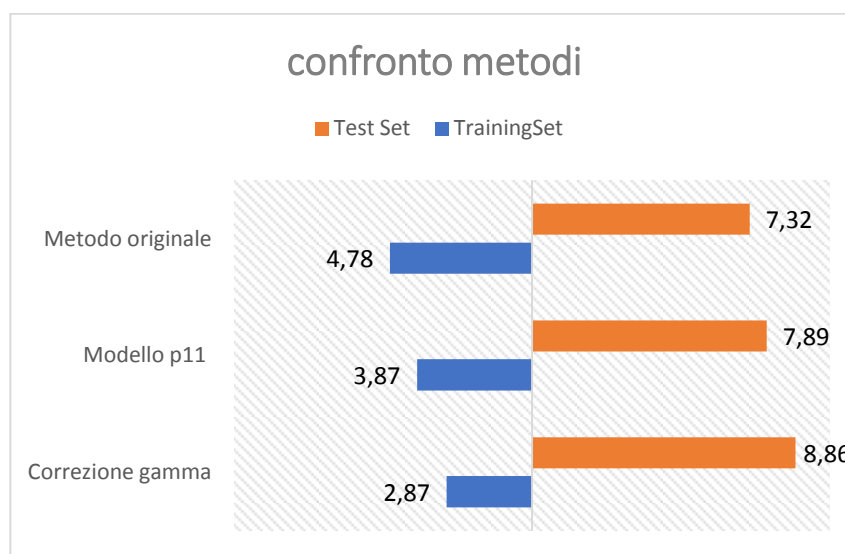


Figura 8.11: Confronto risultati tra training set e test set rispettivamente per ogni metodo utilizzato.

In questo progetto ciò che interessa sono soprattutto i risultati del *test set* (ossia la capacità di generalizzazione del metodo di *caratterizzazione* applicato) ed il metodo originale elaborato nel secondo anno risulta essere effettivamente il più robusto ($\Delta E_{00(\text{medio})} = 7,32 \pm 3,45$). Tuttavia, non è stato ancora raggiunto l’obiettivo prefissato, ed un efficace miglioramento verrà descritto nel Capitolo 10.

Altro aspetto interessante nello svolgere questi confronti, soprattutto nell'analizzare il *training set* composto dalle misure dei 24 tasselli della scala colore e le 30 campiture della tela misurata a marzo 2018 è stato notare come entrambi i metodi, quello originale e quello polinomiale a 11 termini, fossero più precisi per i tasselli "colorati" e meno per quelli "grigi" della scala colore (Tabella 8.14). Questi risultati suggeriscono che molto probabilmente i grigi devono essere studiati a parte, utilizzando un *dataset* composto da soli grigi piuttosto che una mescolanza di cromie diverse.

	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ grigi	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ colorati
Dati fotografici senza correzione	$8,77 \pm 4,56$	$13,55 \pm 3,30$
Metodo polinomiale p11	$6,82 \pm 3,55$	$3,49 \pm 1,78$
Metodo originale	$8,09 \pm 2,29$	$4,36 \pm 2,27$

Tabella 8.14. Media delle differenze colorimetriche tra i dati colorimetrici e corrispettivi fotografici sia senza correzione che corretti mediante il modello polinomiale a 11 termini o il metodo originale.

Ad illustrazione dei confronti effettuati nel presente capitolo, in Figura 8.12 si riporta un esempio visivo della resa sul *training set* (DX + DGIII/18) dei due metodi, quello originale e quello polinomiale a 11 termini, confrontati con la visualizzazione del colore dello stesso campione secondo la macchina fotografica senza alcuna correzione e secondo il colorimetro. La prima colonna a sinistra visualizza, senza alcuna correzione, il colore descritto nell'output RAW della macchina fotografica, la seconda colonna visualizza il colore secondo la misura oggettiva del colorimetro che viene presa come il riferimento della realtà (*ground truth*), la terza colonna visualizza il colore dopo l'applicazione sui dati fotografici della correzione con il metodo originale e l'ultima colonna i dati corretti con il metodo polinomiale a 11 termini.

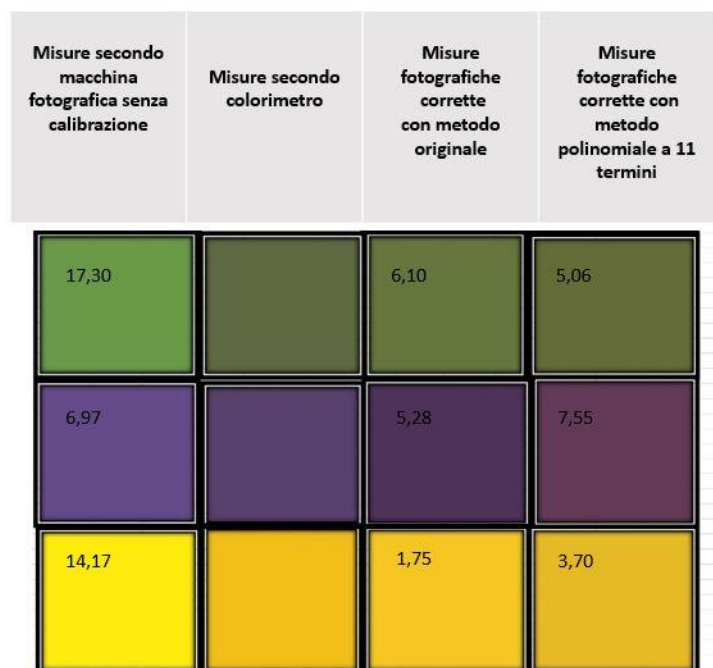


Figura 8.12. Visualizzazione di alcuni dati qualitativi sui colori del dataset DX + DGIII/18. La prima colonna mostra le visualizzazioni estratte dalle foto senza alcuna correzione, la seconda colonna visualizza secondo quanto fornito dal colorimetro, la terza colonna visualizza secondo i dati fotografici corretti con il metodo originale e l'ultima colonna secondo i dati corretti con il metodo polinomiale a 11 termini. I numeri nei riquadri indicano il valore della distanza colorimetrica ΔE .

Capitolo 9

Caratterizzazione di una macchina fotografica a sensore CCD: confronto con la caratterizzazione della fotocamera a sensore CMOS.

I metodi di *caratterizzazione* utilizzati, sia quello (p5) tratto dalla letteratura che quello originale elaborato in questo progetto di dottorato, sono sempre stati applicati su foto scattate con la medesima macchina fotografica, cioè una Lumix DMC-FZ200 Panasonic, dotata di un sensore CMOS. Era d'altra parte logico porsi la domanda se, utilizzando una diversa fotocamera, si sarebbe ottenuto un risultato diverso, o se la tipologia di sensore fotografico potesse in qualche modo influenzare la resa sulle immagini digitali. E' stato pertanto svolto un confronto applicando i metodi di *caratterizzazione* già descritti anche a foto acquisite con una Nikon D50, dotata di sensore CCD.

Fino a diversi anni fa sembravano migliori, come resa visiva, le fotocamere con sensore CCD perché soggetto, quest'ultimo, a meno rumore rispetto al sensore CMOS; tuttavia i progressi nel campo tecnologico sono stati così rapidi che tra i due sensori non dovrebbe più esserci un divario notevole.

La Nikon D50 non è una compatta, pertanto come obiettivo è stato utilizzato l'AF-S DX Micro NIKKOR 40 mm f/2.8G, progettato per la fotografia a distanza ravvicinata (Figura 9.1).



Figura 9.1. A sinistra: corpo Nikon D50; a destra: obiettivo NIKKOR LENS AF-S Micro.

Anche nel caso della Nikon D50 è stato necessario, prima di tutto, stabilire i parametri di *calibrazione*, quelli riguardanti l'esposizione sono riportati in Tabella 9.1, i parametri estetici sono stati mantenuti standard, anche il tipo di illuminante è rimasto standard mentre il set fotografico utilizzato è stato il medesimo della Panasonic Lumix, quindi lampadine a LED OSRAM che simulano l'illuminante D65 disposte a 45° rispetto al piano dove è posto il campione mentre la macchina

fotografica è posta perpendicolarmente a quest'ultimo a circa $76,5 \pm 0,5$ cm di distanza; si è usata la scala ColorChecker Passport Photo della ditta X-Rite come riferimento sul colore fotografico cioè la medesima prassi utilizzata per scattare foto con la Panasonic.

Sensibilità ISO	200
Diaframma	$f/3$
Tempo di esposizione	$1/60$ di secondo
Impostazione	MANUALE
Distanza focale	4mm

Tabella 9.1. Impostazioni dei parametri espositivi della Nikon D50. L'ultima impostazione riguarda l'obiettivo.

Le foto scattate con la Nikon sono state acquisite nel suo formato RAW, NEF, e poi convertite in TIFF 8-bit parimenti a quanto fatto per le foto acquisite con la Lumix: pertanto, le foto in RAW sono state visualizzate in Adobe Lightroom, dove sono state bilanciate mediante il plugin della ditta X-Rite e poi importate in formato TIFF nello spazio colore sRGB. Le foto così acquisite e bilanciate sono state convertite nello spazio CIEXYZ osservatore standard 10° e successivamente in CIELab, con gli stessi programmi scritti su Matlab ed utilizzati per convertire i dati digitali sul colore delle foto scattate con la Lumix in coordinate CIELab.

Sono state effettuate due sessioni fotografiche sulle trenta campiture della tela da me predisposta, una a maggio e l'altra a giugno 2019; la *caratterizzazione* sugli scatti del mese di maggio è stata effettuata considerando una parte di questi campioni come *training set* e la restante come *test set*, mentre la *caratterizzazione* delle foto di giugno è stata realizzata usando come coefficienti correttivi quelli calcolati nel mese di maggio.

Il *training set* ed il *test set* del mese di maggio per le foto acquisite sia con la Nikon che con la Lumix sono stati selezionati come segue, in accordo con una procedura comune in questo tipo di trattamento dei dati:

- le trenta terne di valori (L^* , a^* , b^*) descriventi le trenta campiture della tela sono state divise in sei gruppi di cinque terne ciascuno (Tabella 9.2);
- le prime quattro terne di ogni gruppo sono state aggregate in modo da formare il *training set* (complessivamente 24 terne, relative a 24 campiture), con l'aggiunta della terna relativa al fondo della tela;
- le restanti quinte terne di ogni gruppo sono state aggregate definendo così il *test set* (complessivamente 6 terne, relative a 6 campiture).

Campitura	Gruppo
Bianca I	Primo Gruppo
Bianca II	
Bianca III	
Bianca IV	
Ombra Naturale I	
Ombra Naturale II	
Ombra Naturale III	

Ombra Bruciata I	
Ombra Bruciata II	
Ombra Bruciata III	
Siena Naturale I	Terzo Gruppo
Siena Naturale II	
Siena Naturale III	
Siena Bruciata I	
Siena Bruciata II	
Siena Bruciata III	Quarto Gruppo
Ossido di ferro giallo I	
Ossido di ferro giallo II	
Ossido di ferro giallo III	
Malachite I	
Malachite II	Quinto Gruppo
Malachite III	
Cinabro I	
Cinabro II	
Cinabro III	
Fondo	Sesto Gruppo
Rosa I	
Rosa II	
Rosa III	
Rosa IV	

Tabella 9.2. Schema di come sono stati selezionati training set e test set: le campiture evidenziate in giallo sono state selezionate per formare il training set, le restanti costituiscono il test set.

In definitiva, il *training-set*, ossia il set di dati necessario per comprendere le possibili correlazioni matematiche esistenti tra i dati colorimetrici e i corrispettivi fotografici e per calcolare i coefficienti correttivi, è costituito dalle seguenti campiture:

Training set		
Biacca I	Terra di Siena Naturale I	Malachite II
Biacca II	Terra di Siena Naturale II	Malachite III
Biacca III	Terra di Siena Naturale III	Cinabro I
Biacca IV	Terra di Siena Bruciata I	Cinabro II
Ombra Naturale II	Terra di Siena Bruciata III	Rosa I
Ombra Naturale III	Ossido di ferro I	Rosa II
Ombra Bruciata I	Ossido di ferro II	Rosa III
Ombra Bruciata II	Ossido di ferro III	Fondo

mentre il *test set*, ossia il *dataset* utilizzato per convalidare o meglio valutare la robustezza del sistema è così composto:

<i>Test set</i>
Ombra Naturale I
Ombra Bruciata III
Terra di Siena Bruciata II
Malachite I
Cinabro III
Rosa IV

Il confronto dei risultati dell'applicazione di entrambi i metodi di *caratterizzazione* (quello di letteratura e quello originale) sulle foto scattate con la Nikon (Tabella 9.3) e su quelle scattate con la Lumix (Tabella 9.4) è basato sul valore del parametro ΔE_{00} (calcolato secondo la formula CIEDE 2000) che, come detto, valuta la differenza tra i dati colorimetrici "oggettivi" e quelli fotografici corretti mediante *caratterizzazione*. Come ulteriore confronto, nelle due tabelle sono stati inseriti anche i valori di ΔE_{00} relativi al semplice *bilanciamento* fotografico.

<i>Foto Nikon D50</i>	ΔE_{00} (training set)	ΔE_{00} (test set)
Solo bilanciamento X-Rite	11,25±0,36	10,45±0,69
X-Rite + <i>caratterizzazione</i> (metodo di letteratura)	2,03 ± 0,17	2,43 ± 0,36
X-Rite + <i>caratterizzazione</i> (metodo originale)	2,57 ± 0,27	2,94 ± 0,48

Tabella 9.3. Differenze colorimetriche medie tra i dati colorimetrici e i corrispettivi ottenuti con fotocamera Nikon D50.

<i>Foto Panasonic Lumix</i>	ΔE_{00} (training set)	ΔE_{00} (test set)
Solo bilanciamento X-Rite	8,54±0,37	8,89 ± 0,69
X-Rite + <i>caratterizzazione</i> (metodo di letteratura)	1,99 ± 0,17	2,06 ± 0,24
X-Rite + <i>caratterizzazione</i> (metodo originale)	2,40 ± 0,21	2,60 ± 0,37

Tabella 9.4. Differenze colorimetriche medie tra i dati colorimetrici e i corrispettivi ottenuti con fotocamera Panasonic Lumix.

Come evidente dalle tabelle, i valori di ΔE_{00} mostrano una migliore approssimazione tra i dati spettrofotometrici e quelli acquisiti con la Panasonic se ci si ferma ad osservare il solo *bilanciamento* tramite X-Rite.

Per quanto riguarda le *caratterizzazioni*, il miglioramento dei risultati è notevole, con valori di distanza sempre sotto a 3, per entrambi i sensori, dimostrando che i metodi proposti, basati sul contenuto informativo dei dati hanno buone prestazioni anche senza utilizzo di conoscenza a priori sul sensore utilizzato e hanno una efficacia generale.

Come anticipato, i coefficienti correttivi individuati a partire dal *training set* del mese di maggio con entrambi i metodi di *caratterizzazione* (quello di letteratura e quello originale) sono stati utilizzati per correggere i valori estratti dalle foto scattate nel mese di giugno con le due fotocamere (*dataset* DGV1/19)). In questo caso le differenze colorimetriche medie tra i dati colorimetrici ed i corrispettivi digitali (Tabella 9.5) mostrano una migliore generalizzazione per quanto riguarda la *caratterizzazione* sulle foto acquisite con la Nikon D50; d'altro canto, la Panasonic risulta particolarmente più efficace nel caso del semplice *bilanciamento* così come nel caso delle correzioni lineari sui parametri L^* , a^* , e b^* (Figure 9.2 e 9.3 e Tabella 9.6).

Test set: DGVI/19	ΔE_{00} (Panasonic)	ΔE_{00} (Nikon D50)
Solo <i>bilanciamento</i> X-Rite	$6,79 \pm 2,09$	$12,63 \pm 3,27$
X-Rite + <i>caratterizzazione</i> (metodo di letteratura)	$5,49 \pm 2,23$	$3,07 \pm 1,80$
X-Rite + <i>caratterizzazione</i> (metodo originale)	$5,76 \pm 2,16$	$4,28 \pm 2,88$

Tabella 9.5. Differenze colorimetriche medie tra i dati colorimetrici e i corrispettivi ottenuti con fotocamera Panasonic o Nikon D50.

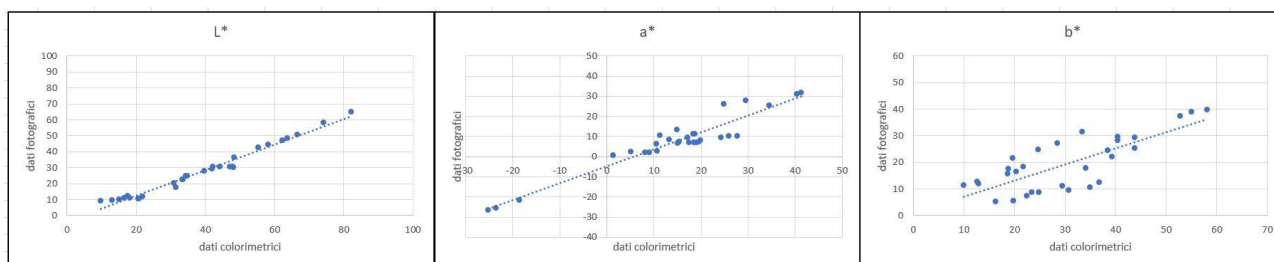


Figura 9.2. Correlazioni tra i dati colorimetrici e quelli acquisiti nella sessione fotografica di giugno 2019 con la Nikon D50 e bilanciate con il plugin della ditta X-Rite.

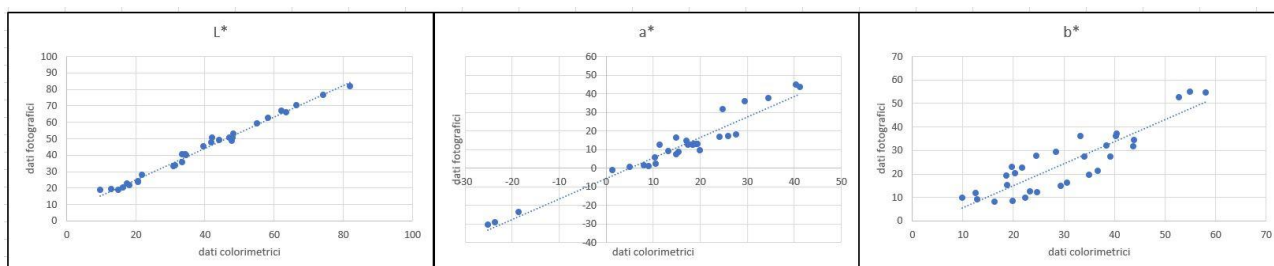


Figura 9.3. Correlazioni tra i dati colorimetrici e quelli acquisiti nella sessione fotografica di giugno 2019 con la Panasonic Lumix DMC-FZ200 e bilanciate con il plugin della ditta X-Rite.

Dataset DGVI/19	r_{L^*}	r_{a^*}	r_{b^*}
Nikon D50	0,989536	0,953345	0,7685
Panasonic Lumix DMC-FZ200	0,9945	0,96882	0,8898

Tabella 9.6. Indici di Pearson tra i dati colorimetrici e i corrispettivi acquisiti con una fotocamera ed elaborati con il plugin della ditta X-Rite.

Nel complesso, i risultati derivanti dalle sessioni fotografiche nel confronto tra le due fotocamere inducono ad ipotizzare che i metodi di *caratterizzazione* utilizzati siano validi in entrambi i casi; ovviamente a seconda dello strumento fotografico un metodo può risultare più efficace dell'altro.

Un aspetto da tenere in considerazione è che i dati estratti dalle foto ottenute con la Lumix e semplicemente *bilanciati* fotograficamente risultano decisamente più correlati ai dati colorimetrici rispetto a quelli derivanti da immagini acquisite con la Nikon D50: sia le correlazioni che gli indici di Pearson dei valori acquisiti con la Lumix mostrano una maggiore coerenza ed affinità con i dati

colorimetrici, soprattutto per le componenti a^* e b^* , mentre la componente L^* presenta ottime correlazioni nei dati estratti dalle immagini digitali registrate con entrambe le macchine fotografiche.

I risultati ottenuti evidenziano anche come effettivamente i metodi di *caratterizzazione* indagati (sia quello di letteratura che quello originale) siano efficaci ed utilizzabili indipendentemente dal tipo di fotocamera a disposizione: sembrerebbe, cioè, di poter escludere un divario, quantitativo e qualitativo, tra i due diversi sensori (CCD e CMOS). Ovviamente quest'ultima affermazione è solo una prima impressione perché in questo studio è stato possibile utilizzare solo una macchina fotografica a CCD e solo una macchina fotografica a CMOS; tuttavia bisogna considerare che ad oggi la maggior parte di fotocamere in commercio, dalle più amatoriali alle più professionali, sono prodotte quasi esclusivamente con sensori CMOS, per cui indagare più nel dettaglio se è meglio un sensore piuttosto che un altro diventa secondario mentre è utile valutare e garantire che i metodi di *caratterizzazione* indagati siano applicabili a qualunque fotocamera. Attualmente, come già detto, le due tecnologie non presentano così evidenti differenze; a volte le fotocamere professionali anche oggi preferiscono il sensore CCD.

Capitolo 10

La caratterizzazione per “classi” di campioni

A seguito dei risultati non del tutto soddisfacenti descritti nel capitolo precedente, supponendo che i campioni di pigmenti trattati nei *dataset* disponibili non siano compatibili con la definizione di omoschedasticità, si è deciso di valutare la possibilità di perfezionare il metodo attraverso un modello adattivo multiclasse. La definizione di tale approccio si basa su un’analisi statistica più approfondita dei dati. Sono state valutate due possibili suddivisioni alternative dei campioni in classi sulla base di:

- cromia apparente;
- elemento chimico principale.

Per entrambe le suddivisioni in sottoclassi, a seguito dell’analisi statistica, sono stati applicati i metodi di *caratterizzazione* polinomiale e originale, andando a valutarne le prestazioni.

10.1. Suddivisione in “classi” sulla base della cromia

Il set di campioni è stato suddiviso in cinque *classi cromatiche*:

- tre classi caratterizzate dalla stessa cromia: classi del Rosso, del Blu e del Giallo,
- una quarta classe costituita da campioni di tre cromie differenti: Arancione + Rosso + Giallo,
- una quinta costituita da campioni di due cromie differenti: Blu + Verde.

Classe del Giallo

Training set: 13 campiture di cromia gialla che non presentano il piombo come elemento chimico caratterizzante, appartenenti alle tavole di La Venaria Reale (sulla tela presso il DCCI non sono depositati campioni di colorazione gialla) (*DRgiaXII/18 senza Pb*).

Test set: 4 campiture di cromia gialla aventi il piombo nella loro composizione chimica (*DRgiaXII/18 con Pb*).

La suddivisione delle campiture tra *training set* e *test set* è forse statisticamente discutibile, ma risponde alla possibilità di ottenere un risultato basato al tempo stesso anche sulla composizione chimica.

Esempi di pigmenti inclusi nella “classe del giallo” non contenenti piombo

As₂S₃ (orpimento)

C₁₈H₁₈N₄O₆ (giallo brillante: azocolorante organico)

K₃Co(NO₂)₆·3H₂O (giallo cobalto - aureolina)

BaCrO₄ (giallo barite)

CdS+ZnO (giallo cadmio)

Classe del Rosso

Training set —: 15 campiture di cromia rossa che non presentano il ferro come loro elemento chimico caratterizzante, appartenenti sia alla tela di Genova che alle tavole di La Venaria Reale

(*DGrosI/19+DRrosXII/18 senza Fe*).

Test set 1 (TS1): 3 campiture di cromia rossa (cinabro) dalla tela di Genova misurate nei mesi di febbraio e marzo 2019 (*DGrosII/19+DGrosIII/19*).

Test set 2 (TS2): le stesse campiture del *test set 1* misurate nei mesi di aprile e maggio 2019 (*DGrosIV/19+DGrosV/19*).

Esempi di pigmenti inclusi nella “classe del rosso”

$Fe_2O_3 + Al_2Si_2O_5(OH)_4$ (bolo rosso)

$2PbO \cdot PbO_2$ (minio)

HgS (cinabro)

$Ca(Sn,Cr)SiO_5$ (color garofano)

$CdS \cdot CdSe$ (rosso cadmio)

Classe del Blu

Training set: 21 campiture di cromia blu e di differente composizione chimica appartenenti alle tavole di La Venaria Reale (sulla tela presso il DCCI non sono depositati campioni di colorazione blu) (*DRbluXII/18*).

Test set: 3 campiture di cromia blu appartenenti alle tavole di La Venaria Reale (*DRbluXII/18*).

Esempi di pigmenti inclusi nella “classe del blu”

$(Na, Ca)_8[(SO_4, S, Cl)_2(AlSiO_4)_6]$ (lazzurite)

$ZrSiO_4$ (zirconio)

$(Co,Zn)_2SiO_4$ (willemite)

$CoAl_2O_4$ (blu cobalto)

Classe mista dell'Arancione + Rosso + Giallo

Training set: 42 campiture di diversa composizione chimica e di cromia gialla, rossa o arancione, dalle tavole di La Venaria Reale (*DRargXII/18+DGverI/19*).

Test set: le 3 campiture di cinabro (anche denominato “vermiglione” o “rosso vermiglio”; ha una tonalità di rosso molto vivo, colore intermedio fra l'arancione ed il rosso porpora) della tela di Genova, misurate nei mesi di febbraio e marzo 2019 (*DGverII/19+DGverIII/19*).

Classe mista del Blu + Verde

Training set: 42 campiture di varia natura chimica ma di cromia verde o blu provenienti sia dalle tavole di La Venaria Reale che dalla tela del DCCI (3 campiture di malachite, o “verde azzurro di Magna Grecia, di cromia appunto verde-azzurra, misurate a gennaio 2019) (*DRbvXII/18+DGval/19*).

Test set: le 3 campiture di malachite della tela di Genova, misurate a febbraio e a marzo 2019 (*DGvall/2019+DGvallII/2019*).

Classe degli Esclusi

Training set: le 82 campiture di varia natura chimica non appartenenti alle classi cromatiche sopra descritte, provenienti sia dalla tela di Genova (misurate a gennaio 2019) che dalle tavole di La Venaria Reale (misurate

a dicembre 2018) (*DGescI/19+DRescXII/18*).

Test set: le campiture della tela di Genova misurate nel mese di febbraio 2019 (*DGescI/19*).

Sulla base della suddetta suddivisione in sottoclassi secondo la cromia, per ogni classe sono state calcolate le matrici di covarianza (Tabelle 10.1-10.6) che si riferiscono alle misure acquisite con il colorimetro e ai corrispettivi valori di output della fotocamera.

Sia una valutazione qualitativa che opportune metriche di distanza, mettono in evidenza come queste matrici risultano sensibilmente diverse per ogni classe, mostrando una buona coerenza tra i dati colorimetrici e i corrispettivi fotografici per ciascuna classe.

I valori sulla diagonale delle matrici, che definiscono le varianze sui parametri L^* , a^* e b^* , sono ovviamente molto diversi tra classe e classe. La maggiore distinzione si apprezza però analizzando i valori delle cross-correlazioni tra i parametri. Infatti, mentre un grande campione che aggregasse tutte le possibili classi delle tinte pittoriche avrebbe parametri di cromaticità a^* e b^* indipendenti, la correlazione nel presente studio non è nulla ed è caratteristica all'interno di ogni classe.

Classe del Giallo					
Matrice di Covarianza: dati colorimetrici			Matrice di Covarianza: dati fotografici		
583,1611	-33,0208	686,0597	476,151	-53,1502	460,4226
-33,0208	66,35061	35,98268	-53,1502	56,13409	-27,0589
686,0597	35,98268	1256,649	460,4226	-27,0589	698,6534

Tabella 10.1. Matrici di Covarianza sui dati del training set della classe del Giallo.

Classe del Rosso					
Matrice di Covarianza: dati colorimetrici			Matrice di Covarianza: dati fotografici		
177,4401	142,7145	205,3727	126,3179	201,3278	153,3337
142,7145	205,298	212,3539	201,3278	435,2334	325,1084
205,3727	212,3539	321,8903	153,3337	325,1084	275,1148

Tabella 10.2. Matrici di Covarianza sui dati del training set della classe del Rosso.

Classe del Blu					
Matrice di Covarianza: dati colorimetrici			Matrice di Covarianza: dati fotografici		
231,5365	-253,088	143,9167	219,9256	-220,674	157,4255
-253,088	432,9442	-272,873	-220,674	342,7349	-313,799
143,9167	-272,873	380,2616	157,4255	-313,799	423,8886

Tabella 10.3. Matrici di Covarianza sui dati del training set della classe del Blu.

Classe dell'Arancione + Rosso + Giallo					
Matrice di Covarianza: dati colorimetrici			Matrice di Covarianza: dati fotografici		
583,406	-169,28	622,6635	499,3195	-201,966	463,1864
-169,28	304,7767	-55,6503	-201,966	504,7171	-54,7752
622,6635	-55,6503	998,105	463,1864	-54,7752	683,0891

Tabella 10.4. Matrici di Covarianza sui dati del training set della classe dell'Arancione + Giallo + Rosso.

Classe del Blu + Verde					
Matrice di Covarianza: dati colorimetrici			Matrice di Covarianza: dati fotografici		
355,3081	-224,372	318,3848	378,4218	-266,649	344,2954
-224,372	480,7394	-262,426	-266,649	432,9858	-305,883
318,3848	-262,426	572,2833	344,2954	-305,883	607,1281

Tabella 10.5. Matrici di Covarianza sui dati del training set della classe del Blu + Verde.

Classe degli Esclusi					
Matrice di Covarianza: dati colorimetrici			Matrice di Covarianza: dati fotografici		
763,2042	-28,0496	312,8771	645,529	-46,4805	353,1782
-28,0496	301,8414	260,1734	-46,4805	454,7189	226,5453
312,8771	260,1734	725,0535	353,1782	226,5453	869,1906

Tabella 10.6. Matrici di Covarianza sui dati del training set della classe degli Esclusi.

Sui dati organizzati per classi cromatiche sono stati applicati il metodo di *caratterizzazione* letteratura (nello specifico il metodo parametrico **p5** descritto nel Capitolo 8) ed il metodo originale. La valutazione, eseguita prima sul *training set*, è stata poi verificata su uno o due (quando disponibili) *test set*. Nel seguito si riportano le tabelle delle prestazioni (Tabelle 10.7-10.13).

Classe del Giallo	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del training set ^a
Metodo di letteratura (p5)	3,09 ± 1,43
Metodo originale	2,39 ± 1,63
	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del test set ^b
Metodo di letteratura (p5)	3,95 ± 3,30
Metodo originale	5,67 ± 3,44

^aDRgiaXII/18 senza Pb. ^bDRgiaXII/18 con Pb.

Tabella 10.7. Differenza colorimetrica media tra dati colorimetrici e corrispettivi digitali corretti con i diversi metodi per la caratterizzazione per la classe del Giallo.

Classe del Rosso	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del training set ^a	
Metodo di letteratura (p5)	4,90±5,74	
Metodo originale	8,36±7,16	
	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del test set 1 ^b	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del test set 2 ^c
Metodo di letteratura (p5)	1,87±0,73	2,07±0,86
Metodo originale	1,89±1,24	3,15±2,03

^aDGrosI/19+DRrosXII/18 senza Fe. ^bDGrosII/19+DGrosIII/19. ^cDGrosIV/19+DGrosV/19.

Tabella 10.8. Differenza colorimetrica media tra dati colorimetrici e corrispettivi digitali corretti con i diversi metodi per la caratterizzazione per la classe del Rosso.

Classe del Blu	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del training set ^a
Metodo di letteratura	5,73 ± 2,97
Metodo originale	5,33 ± 2,28
	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del test set ^b
Metodo di letteratura	3,80 ± 1,67
Metodo originale	3,55 ± 0,19

^aDRbluXII/18. ^bDRbluXII/18.

Tabella 10.9. Differenza colorimetrica media tra dati colorimetrici e corrispettivi digitali corretti con i diversi metodi per la caratterizzazione per la classe del Blu.

Classe dell'Arancione + Rosso + Giallo	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del training set ^a
Metodo di letteratura	5,13 ± 3,70
Metodo originale	5,09 ± 4,01
	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del test set ^b
Metodo di letteratura	8,02 ± 2,86
Metodo originale	9,17 ± 2,49

DRargXII/18+DGverI/19. DGverII/19+DGverIII/19.

Tabella 10.10. Differenza colorimetrica media tra dati colorimetrici e corrispettivi digitali corretti con i diversi metodi per la caratterizzazione per la classe dell'Arancione + Rosso + Giallo.

Classe del Blu + Verde	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del training set ^a
Metodo di letteratura	7,27 ± 4,59
Metodo originale	5,47 ± 3,04
	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del test set ^b
Metodo di letteratura	5,12 ± 1,53
Metodo originale	4,96 ± 1,14

^aDRbvXII/18+DGval/19. ^bDGvalI/2019+DGvalII/19.

Tabella 10.11. Differenza colorimetrica media tra dati colorimetrici e corrispettivi digitali corretti con i diversi metodi per la caratterizzazione per la classe del Blu + Verdi (o verde azzurro).

Classe degli Esclusi	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del training set ^a
Metodo di letteratura	6,80 ± 3,89
Metodo originale	7,23 ± 2,66
	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del test set ^b
Metodo di letteratura	6,02 ± 3,28
Metodo originale	5,35 ± 2,48

^aDGescI/19+DRescXII/18. ^bDGescII/19.

Tabella 10.12. Differenza colorimetrica media tra dati colorimetrici e corrispettivi digitali corretti con i diversi metodi per la caratterizzazione per la classe degli Esclusi (tutti i pigmenti non analizzati nelle classi cromatiche sopra descritte).

Come si può notare dalle tabelle, la *caratterizzazione* per classe cromatica ha dimostrato una buona capacità di generalizzazione anche nei casi in cui *training set* e *test set* siano stati scelti con criteri diversi (come per i gialli e i rossi).

Come contro-verifica della validità del test per classi cromatiche, i coefficienti correttivi calcolati per la classe del blu sono stati applicati anche ad un *test set* costituito da 18 misure di campioni di colorazione rossa provenienti sia dalle tavole, misurate a dicembre 2018, che dalla tela e misurata nel mese di gennaio 2019 (DRrosXII/18+DGrosI/19) (Tabella 10.13). I risultati del test illustrano quanto la *caratterizzazione* per classe cromatica fornisca dei risultati totalmente distanti da quelli di riferimento (i dati del colorimetro), se applicata a campioni di una classe cromatica differente.

Classe del Blu	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del <i>test set</i> ^a
Metodo di letteratura	$38,99 \pm 12,97$
Metodo originale	$22,15 \pm 7,43$

^a DRrosXII/18+DGrosI/19.

Tabella 10.13. Differenza colorimetrica media tra dati colorimetrici e corrispettivi digitali corretti con i diversi metodi per la caratterizzazione per la classe del Blu, **applicati ad una classe del rosso**.

10.2. Suddivisione in “classi” sulla base dell’elemento chimico predominante

L’intero *dataset* è stato suddiviso anche in 4 classi in funzione dell’elemento chimico caratterizzante la campitura misurata: la classe del Ferro, del Piombo, del Rame e degli Esclusi cioè le misure dei campioni non aventi come elemento chimico principale uno dei tre appena citati.

Classe del Ferro

Training set: 35 misure di pigmenti caratterizzati dall’elemento ferro, soprattutto ocre o terre naturali, quindi campiture di colorazione marrone, ocre e in alcuni casi rossa. I campioni provengono sia dalla tela del DCCI (misurati nel mese di gennaio 2019) che dalle tavole di La Venaria Reale (misurati nel mese di dicembre 2018) (DGFeI/19+DRFeXII/18).

Test set 1 (TS1): 32 misure delle terre naturali stese sulla tela, acquisite nei mesi di febbraio e marzo 2019 (DGFeII/19+DGFeIII/19).

Test set 2 (TS2): come per il *test set 1*, ma con misure acquisite nei mesi di aprile e maggio 2019 (DGFeIV/19+DGFeV/19).

Esempi di pigmenti inclusi nella “classe del ferro”

$Fe_2O_3 + MnO_2 + SiO_2 + Al_2O_3$ (terra di Siena)

Fe_2O_3 (caput mortuum)

$Fe_4[Fe(CN)_6]_3 \cdot 6H_2O$ o $KFe[Fe(CN)_6] \cdot 6H_2O$ (blu di Prussia)

$FeCr_2O_4$ (verde ferro-cromo)

$NaFeSi_2O_6$ (egirina)

Classe del Piombo

Training set: 16 misure di campioni gialli, bianchi e rosa provenienti dalla tela del DCCI, acquisite nel mese di gennaio 2019, e dalle tavole di La Venaria Reale, acquisite a dicembre 2018 (DGPbI/19+DRPbXII/18).

Test set (TS1): 16 misure delle campiture bianche e rosa componenti la tela del DCCI, acquisite nei mesi di febbraio e marzo 2019 (*DGPbII/19+DGPbIII/19*).

Test set 2 (TS2): come per il test set 1, ma con misure effettuate nei mesi di aprile e maggio 2019 (*DGPbIV/19+DGPbV/19*).

Esempi di pigmenti inclusi nella “classe del piombo”

$2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$ (bianco di piombo - biacca)

$2\text{PbO} \cdot \text{PbO}_2$ (minio)

Pb_2SnO_4 (giallolino o giallorino)

$\text{Pb}(\text{Sn},\text{Si})\text{O}_3$ (giallo di piombo e stagno)

$\text{Pb}(\text{Sb},\text{Sn})\text{O}_3$ (antimoniato di Sn e Pb: giallo di Napoli parigino)

PbSO_4 (solfato di piombo)

PbCrO_4 (cromato di piombo - giallo cromo)

Classe del Rame

Training set: 19 misure di campioni blu e verdi stesi sia sulla tela del DCCI, acquisite nel mese di gennaio 2019, che sulle 2 tavole de La Venaria Reale, prese a dicembre 2018 (*DGCuI/19+DRCuXII/18*).

Test set (TS1): 6 misure delle campiture verdi componenti la tela del DCCI, acquisite nei mesi di febbraio e marzo 2019 (*DGCuII/19+DGCuIII/19*).

Test set 2 (TS2): come per il test set 1, ma con misure effettuate nei mesi di aprile e maggio 2019 (*DGCuIV/19+DGCuV/19*).

Esempi di pigmenti inclusi nella “classe del rame”

$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2 \rightarrow 2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ (azzurrite)

$\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ (verderame sintetico)

$(\text{Cu},\text{Ca})(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [blu di Ploss: acetato misto di Cu(II) e Ca, idrato]

$\text{C}_{32}\text{H}_{16}\text{CuN}_8$ (Cu-ftalocianina)

$\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ (malachite)

Classe degli Esclusi

Training set: 78 misure delle campiture non aventi nella propria composizione chimica gli elementi sopra citati; questi campioni appartengono sia alla tela del DCCI (misure acquisite a gennaio 2019) che alle tavole de La Venaria Reale (misure acquisite a dicembre 2018) (*DGMixI/19+DRMixXII/18*).

Test set: 30 misure delle campiture stese sulla tela del DCCI, acquisite nel mese di febbraio 2019 (*DGMixII/19*).

Anche in questo caso sono state calcolate le matrici di covarianza (Tabelle 10.14-10.17) sia sui dati colorimetrici che fotografici di ogni classe: queste mostrano una certa coerenza, all'interno della stessa classe, tra i dati colorimetrici e corrispettivi fotografici ma allo stesso tempo si differenziano da classe a classe, giustificando così la necessità di avvalersi di una specifica regressione di *caratterizzazione* per ogni classe.

Classe del Ferro					
Matrice di Covarianza: dati colorimetrici			Matrice di Covarianza: dati fotografici		
169,944	60,11128	184,4188	114,6719	56,48755	164,7362
60,11128	81,99925	89,03338	56,48755	96,98015	76,10096
184,4188	89,03338	237,449	164,7362	76,10096	279,6156

Tabella 10.14. Matrici di Covarianza sui dati del training set della classe del Ferro.

Classe del Piombo					
Matrice di Covarianza: dati colorimetrici			Matrice di Covarianza: dati fotografici		
201,38	-111,657	-48,8457	212,1033	-164,805	-52,995
-111,657	296,7618	211,9878	-164,805	325,7152	166,5547
-48,8457	211,9878	541,939	-52,995	166,5547	478,195

Tabella 10.15. Matrici di Covarianza sui dati del training set della classe del Piombo.

Classe del Rame					
Matrice di Covarianza: dati colorimetrici			Matrice di Covarianza: dati fotografici		
284,9258	-203,055	222,456	264,0362	-229,082	199,6249
-203,055	356,0932	-237,408	-229,082	275,4875	-208,007
222,456	-237,408	253,3407	199,6249	-208,007	210,5803

Tabella 10.16. Matrici di Covarianza sui dati del training set della classe del Rame.

Classe degli Esclusi					
Matrice di Covarianza: dati colorimetrici			Matrice di Covarianza: dati fotografici		
780,8782	-26,6904	747,5338	730,6975	-37,7079	705,0105
-26,6904	728,1469	325,9047	-37,7079	819,1018	289,0797
747,5338	325,9047	1613,871	705,0105	289,0797	1400,646

Tabella 10.17. Matrici di Covarianza sui dati del training set della classe degli Esclusi.

Ripetendo la procedura vista al paragrafo precedente, sono state calcolate le differenze tra i dati colorimetrici e i corrispondenti dati fotografici caratterizzati applicando il metodo polinomiale p5 e il metodo originale separatamente per ogni classe (Tabelle 10.18-10.21).

Classe del Ferro	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del training set ^a	
Metodo di letteratura (p5)	2,81 ± 1,66	
Metodo originale	4,64 ± 2,08	
	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del test set 1 ^b	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del test set 2 ^c
Metodo di letteratura (p5)	1,93 ± 0,97	1,85 ± 0,69
Metodo originale	4,09 ± 1,64	4,70 ± 1,33

^aDGFeI/19+DRFeXII/18. ^bDGFeII/19+DGFeIII/19. ^cDGFeIV/19+DGFeV/19.

Tabella 10.18. Differenza colorimetrica media tra dati colorimetrici e corrispettivi digitali corretti con i diversi metodi per la caratterizzazione per la classe del ferro.

Classe del Piombo	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del training set ^a	
Metodo di letteratura (p5)	4,50 ± 1,77	
Metodo originale	5,14 ± 3,81	
	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del test set 1 ^b	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del test set 2 ^c
Metodo di letteratura (p5)	4,20 ± 1,26	6,12 ± 1,61
Metodo originale	2,39 ± 0,76	3,48 ± 1,27

^aDGPbI/19+DRPbXII/18. ^bDGPbII/19+DGPbIII/19. ^cDGPbIV/19+DGPbV/19.

Tabella 10.19. Differenza colorimetrica media tra dati colorimetrici e corrispettivi digitali corretti con i diversi metodi per la caratterizzazione per la classe del piombo.

Classe del Rame	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del training set ^a	
Metodo di letteratura (p5)	4,30 ± 1,96	
Metodo originale	4,77 ± 3,09	
	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del test set 1 ^b	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del test set 2 ^c
Metodo di letteratura (p5)	3,64 ± 1,28	2,73 ± 1,50
Metodo originale	2,75 ± 1,01	2,34 ± 0,82

^aDGCuI/19+DRCuXII/18. ^bDGCuII/19+DGCuIII/19. ^cDGCuIV/19+DGCuV/19.

Tabella 10.20. Differenza colorimetrica media tra dati colorimetrici e corrispettivi digitali corretti con i diversi metodi per la caratterizzazione per la classe del rame.

Classe degli Esclusi	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del training set ^a
Metodo di letteratura	8,86 ± 9,70
Metodo originale	9,48 ± 8,92
	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del test set ^b
Metodo di letteratura	5,73 ± 1,99
Metodo originale	5,08 ± 1,20

^aDGMixI/19+DRMixXII/18. ^bDGMixII/19.

Tabella 10.21. Differenza colorimetrica media tra dati colorimetrici e corrispettivi digitali corretti con i diversi metodi per la caratterizzazione per la classe degli Esclusi.

La *caratterizzazione* secondo le classi definite dall'elemento chimico principale fornisce i migliori risultati sinora ottenuti. La Figura 10.1 mostra graficamente i valori $\Delta E_{00(\text{medio})}$ ottenuti per le varie classi, permettendo un confronto visivo. Le barre sulla sinistra rappresentano le prestazioni sul *training set*; le barre sulla destra rappresentano la valutazione sui *test set* (due diversi per ogni classe). La barra inferiore (blu) si riferisce al metodo di letteratura (p5), la barra superiore (gialla o arancione) al metodo originale. Così come per l'approccio globale utilizzato al Capitolo 8, in generale il metodo di letteratura ha migliori prestazioni quando valutato sul *training*, mentre il metodo originale è migliore sulla valutazione del *test set* (in particolar per i *test set* sia del piombo che del rame, come evidenziato con sfondo grigio nella tabella riprodotta in Figura 10.1), riconfermando che mentre il primo tende a subire problematiche di *overfitting*, il secondo risulta migliore per la generalizzazione, cioè più *robusto*.

Per confrontare i risultati ottenuti dalla *caratterizzazione* "globale" con la media dei risultati ottenuti dalla *caratterizzazione* per le diverse "classi" elementari si riportano le valutazioni di Figura 10.2. Le barre inferiori si riferiscono all'approccio globale; quelle superiori al metodo per

“classi” elementali. Il miglioramento è evidente per quanto concerne il *test set* (parte destra del grafico), specialmente per la procedura originale.



Figura 10.1. Confronto grafico tra i valori $\Delta E_{00}(\text{medio})$ ottenuti per le varie classi basate sulla natura dell’elemento chimico qualificante. ts = test set; tr = training set; CLASS = metodo di letteratura (p5); ORIG = metodo originale.

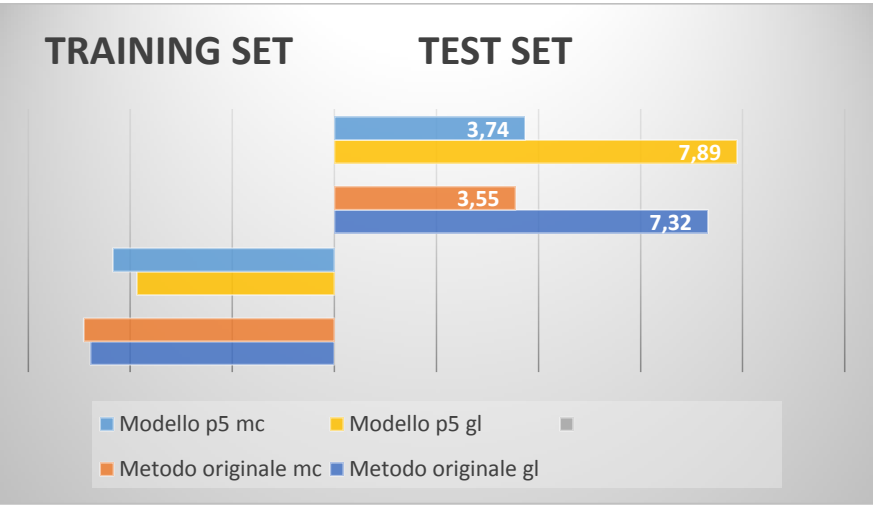


Figura 10.2. Confronto delle medie dei valori $\Delta E_{00}(\text{medio})$ ottenuti sia per set di campioni indifferenziati (gl = globale) sia per le varie classi elementari (mc = metodo per classi). In particolare, per quanto riguarda il metodo per “classi”, sui 7 test set di Figura 10.1 il metodo originale si rivela mediamente più robusto ($\Delta E_{00} = 3,55$) del metodo di letteratura ($\Delta E_{00} = 3,74$).

10.3. Valutazione dell'efficacia della caratterizzazione per "classi" di campioni.

La *caratterizzazione* per classe, ed in particolar modo quella per classi *elementali*, ha sostanzialmente soddisfatto l'obiettivo prefissato per il presente progetto di dottorato, ossia correggere i dati fotografici approssimandoli ai corrispettivi colorimetrici al punto da poter utilizzare i primi al pari dei secondi ai fini di una valutazione sia quali- che quantitativa sul colore ($\Delta E_{00} \leq 3/3,5$ unità colorimetriche). Complessivamente, la *caratterizzazione* per classe ha fornito risultati migliori ed affidabili rispetto ad una *caratterizzazione* che si basi su un *dataset* "indifferenziato", come illustrato in Tabella 10.22, dove sono riportate le differenze colorimetriche come medie tra i ΔE_{00} di tutte le classi studiate.

	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del <i>training set</i>
Set di campioni indifferenziati	
Metodo di letteratura	$5,80 \pm 3,23$
Set di campioni indifferenziati	
Metodo originale	$5,86 \pm 2,96$
Set di campioni per classi	
Metodo di letteratura	$4,35 \pm 0,99$
Set di campioni per classi	
Metodo originale	$5,11 \pm 1,91$
	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del <i>test set</i>
Set di campioni indifferenziati	
Metodo di letteratura	$4,16 \pm 1,26$
Set di campioni indifferenziati	
Metodo originale	$3,96 \pm 1,10$
Set di campioni per classi	
Metodo di letteratura	$3,21 \pm 1,39$
Set di campioni per classi	
Metodo originale	$3,37 \pm 1,14$

Tabella 10.22. Confronto tra l'applicazione dei metodi correttivi a set di campioni indifferenziati o a "classi" di campioni. Nel caso dei set di campioni per classi, la differenza colorimetrica (ΔE_{00}) è la media tra i valori $\Delta E_{00(\text{medio})}$ di ogni classe (sia cromatica che elementare).

Come ulteriore test di verifica, la *caratterizzazione* per la classe del rame è stata applicata anche su un *test set* composto da campiture di colorazione verde simile a quella di alcuni campioni della classe del rame ma senza tale elemento chimico nella propria composizione (Tabella 10.23): risulta evidente come anche la *caratterizzazione* per classe elementare fornisca risultati erranei rispetto a quelli di riferimento se applicata su dati appartenenti ad una classe diversa.

	$\Delta E_{00(\text{medio})}$ del <i>test set</i>
Metodo di letteratura	$16,89 \pm 16,78$
Metodo originale	$16,08 \pm 14,78$

Tabella 10.23. Differenza colorimetrica media tra dati colorimetrici e corrispettivi digitali corretti con i diversi metodi per la caratterizzazione per la classe del Rame (come training set) applicata ad un test set costituito da 4 campiture di cromia "verde" ma non contenenti rame (**DRXII/18**).

Nella Tabella 10.24 vengono infine presentati i coefficienti di Pearson di ciascuna classe, sia per il *training set* che per il/i *test set*: da notare la stretta correlazione esistente tra misure colorimetriche e rispettive fotografiche nell'applicare la *caratterizzazione* nei *test set*. Nella classe del Rame i bassi valori del coefficiente di Pearson sono molto probabilmente legati alla scarsa quantità (6 misure) dei dati che compongono i *test set*.

	Indice di Pearson		
	L*	a*	b*
Classe del Ferro			
Metodo di letteratura (<i>Training</i>)	0,974573	0,978019	0,964748
Metodo originale (<i>Training</i>)	0,914257	0,948962	0,943315
Metodo di letteratura (<i>Test set 1</i>)	0,989649	0,977137	0,974304
Metodo originale (<i>Test set 1</i>)	0,983285	0,911651	0,977713
Metodo di letteratura (<i>Test set 2</i>)	0,989942	0,977638	0,985074
Metodo originale (<i>Test set 2</i>)	0,988505	0,939718	0,965659
Classe del Piombo			
Metodo di letteratura (<i>Training</i>)	0,961949	0,988254	0,935194
Metodo originale (<i>Training</i>)	0,924488	0,989911	0,959617
Metodo di letteratura (<i>Test set 1</i>)	0,961949	0,987511	0,925554
Metodo originale (<i>Test set 1</i>)	0,991599	0,99177	0,964147
Metodo di letteratura (<i>Test set 2</i>)	0,884378	0,992468	0,897142
Metodo originale (<i>Test set 2</i>)	0,979802	0,994015	0,97859
Classe del Rame			
Metodo di letteratura (<i>Training</i>)	0,973986	0,96831	0,973567
Metodo originale (<i>Training</i>)	0,945109	0,917045	0,977411
Metodo di letteratura (<i>Test set 1</i>)	0,753125	0,696038	0,252084
Metodo originale (<i>Test set 1</i>)	0,40161	0,897034	0,594495
Metodo di letteratura (<i>Test set 2</i>)	0,654041	0,878352	0,350008
Metodo originale (<i>Test set 2</i>)	0,551838	0,872072	0,659963
Classe degli Esclusi			
Metodo di letteratura (<i>Training</i>)	0,980026	0,945713	0,971412
Metodo originale (<i>Training</i>)	0,976665	0,949785	0,971038
Metodo di letteratura (<i>Test set 1</i>)	0,994609	0,976047	0,777796
Metodo originale (<i>Test set 1</i>)	0,996707	0,975277	0,866939

Tabella 10.24. Coefficienti di Pearson tra i dati colorimetrici e i corrispettivi fotografici caratterizzati per ogni singola classe indagata.

10.4. Applicazione della caratterizzazione per “classi” all’osservazione dell’andamento nel tempo della cromia di campioni depositati su tela

Nell’ambito dei Beni Culturali, la misurazione del colore ha, tra gli obiettivi del conservatore/restauratore, la valutazione, nel tempo, della variazione cromatica (grado e natura: ad es. causata da una alterazione chimico-fisica del pigmento/colorante) di un’opera pittorica a seguito di un invecchiamento naturale dovuto a fattori diversi, essenzialmente atmosferici ed ovviamente inevitabili a meno di non attivare particolari sistemi protettivi.

Approfittando delle misure sulle campiture della tela di Genova, effettuate a cadenza mensile, ho potuto condurre un’analisi, anche se in un arco temporale necessariamente limitato, delle

possibili variazioni delle componenti colorimetriche. Va precisato che non è stato applicato alcun processo manuale di invecchiamento e la tela è sempre stata conservata ben esposta alla luce solare, ma in un ambiente comunque poco aggressivo.

Visivamente, non si sono evidenziate alterazioni significative, e nel complesso la percezione del colore di questi pigmenti si è mantenuta stabile. Le uniche campiture che nel tempo hanno mostrato, ad occhio nudo, qualche alterazione delle componenti colorimetriche sono le stesure realizzate, a diverse concentrazioni, con il pigmento “Ombra Naturale”. A seguire viene mostrato, a titolo di esempio, l’andamento nel tempo dei campioni stesi a diverse concentrazioni per i pigmenti “Terra di Siena Bruciata” (Figura 10.3) ed “Ombra Naturale” (Figura 10.4): gli andamenti descritti riguardano le componenti colorimetriche L^* , C^* e h (chiarezza, chroma e hue)

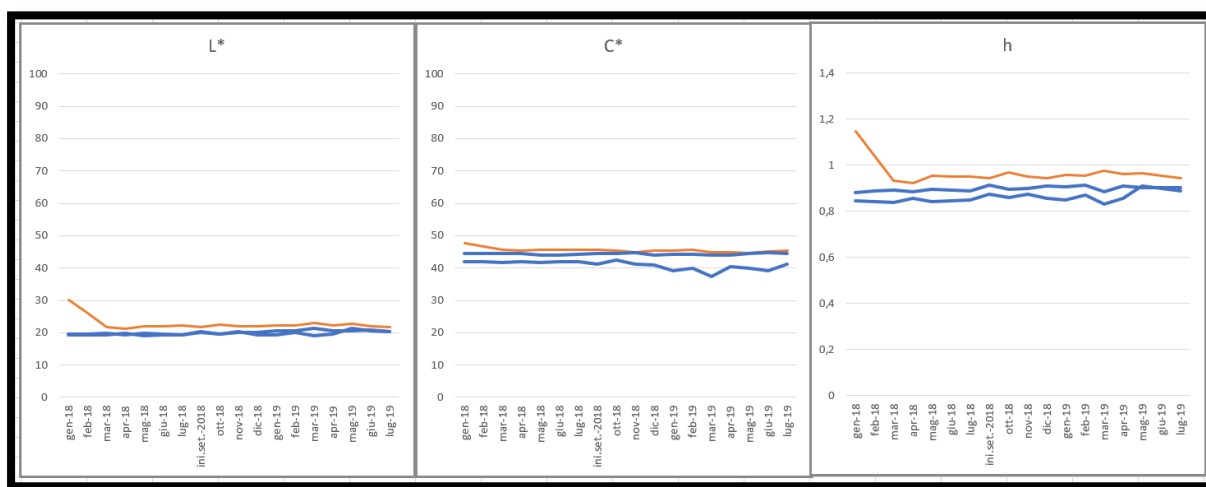


Figura 10.3. Andamento “colorimetrico” nel tempo del pigmento “Terra di Siena Bruciata”, nelle tre diverse concentrazioni di stesura [37,0% (linea arancione), 50,0% (linea centrale), 56,8% (linea inferiore)], descritto secondo le componenti L^* , C^* ed h .

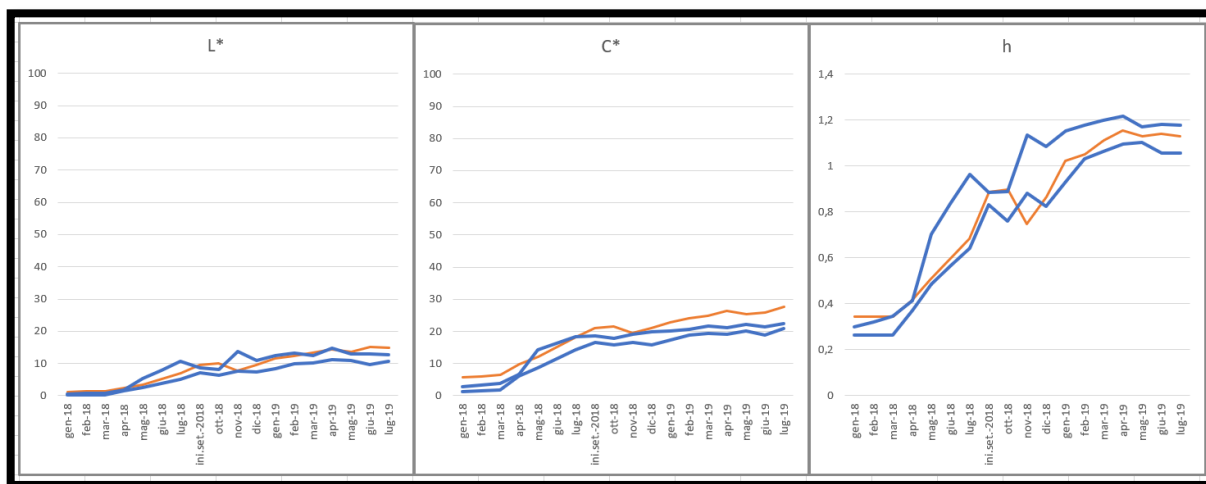


Figura 10.4. Andamento “colorimetrico” nel tempo del pigmento “Ombra Naturale”, nelle tre diverse concentrazioni di stesura [44,1% (linea arancione), 53,7% (linea blu superiore), 67,6% (linea blu inferiore)], descritto secondo le componenti L^* , C^* ed h .

Le misurazioni periodiche dei pigmenti su tela sono state utilizzate anche per confrontare, nel monitoraggio dell’evoluzione cromatica, colorimetria e fotografia digitale dopo caratterizzazione. A

tal fine sono state utilizzate, a titolo di esempio, le misurazioni sul pigmento “Ossido di ferro giallo”, *caratterizzate* sia secondo un set di campioni indifferenziati (Figura 10.5) sia secondo la “classe” del ferro (Figura 10.6): in entrambi i casi i risultati sono stati confrontati con i rispettivi dati colorimetrici. La conferma della migliore performance della *caratterizzazione* per classe è evidente anche in questo tipo di analisi: l’equiparazione con i dati colorimetrici è chiaramente non proponibile nel caso di una *caratterizzazione* secondo un set di campioni indifferenziati, dove la correzione dei valori fotografici presenta ancora un margine d’errore troppo alto (Figura 10.5); viceversa, la *caratterizzazione* per singola classe consente di sovrapporre quasi esattamente, nei grafici di Figura 10.6, i dati fotografici a quelli colorimetrici.

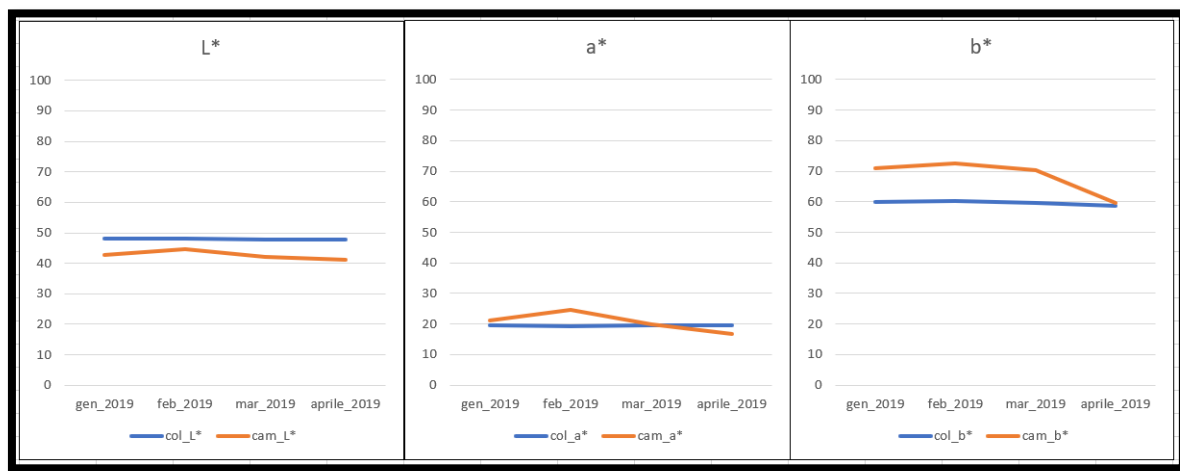


Figura 10.5. Andamento nel corso del tempo del pigmento Ossido di Ferro steso su tela: a confronto i dati colorimetrici (in blu) con i corrispettivi digitali corretti con la caratterizzazione per il set misto (in arancione).

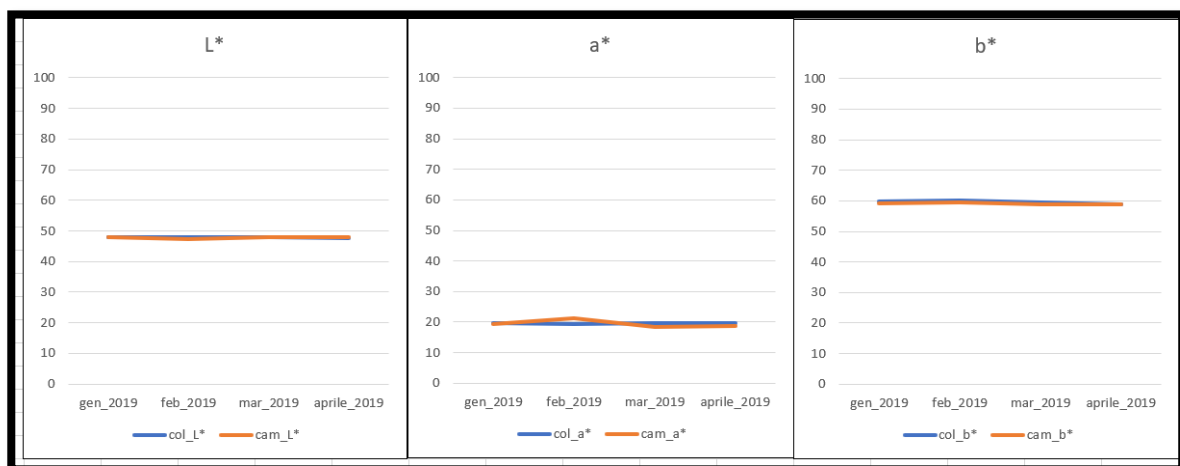


Figura 10.6. Andamento nel corso del tempo del pigmento Ossido di Ferro steso su tela: a confronto i dati colorimetrici (in blu) con i corrispettivi digitali corretti con la caratterizzazione per la classe del ferro (in arancione).

10.5. Considerazioni riassuntive sul significato della caratterizzazione per “classi”

Riassumendo, le indagini svolte sulla *caratterizzazione* per singola classe hanno evidenziato come questo approccio abbia essenzialmente raggiunto l’obiettivo prefissato, ossia una correzione dei dati fotografici tale da avvicinarli ai corrispettivi colorimetrici (con valori della differenza colorimetrica ΔE_{00} pari a poche unità colorimetriche: $\Delta E_{00} \leq 3 \div 3.5$). Come atteso, a conferma della efficacia del metodo, la *caratterizzazione* per singola classe funziona solo se applicata a campioni appartenenti alla stessa classe, come risulta ad esempio dalle Tabelle 10.4 o 10.20: se il metodo è applicato a campioni non appartenenti alla medesima classe i valori fotografici risultano poco, o per nulla, confrontabili coi corrispettivi colorimetrici.

L’approccio proposto per la specifica operazione di correzione colorimetrica per classi si riferisce a una regressione supervisionata che si basa implicitamente su una stima dei modelli statistici delle singole classi, così come ottenuti dal training set corrispondente.

Poiché il processo di regressione è intimamente collegato al processo di classificazione, i modelli ricavati dalla fase di addestramento si prestano ovviamente bene a ulteriori considerazioni e analisi sui beni artistici. Si riesce così, in modo indiretto a riconoscere la classe di appartenenza di un campione valutando il processo di correzione.

Per esempio, si supponga di avere a disposizione il dato fotografico e la corrispondente misura colorimetrica di un campione di cui sia ignota la classe di appartenenza. Provando ad applicare al campione la correzione per tutte le classi (ad esempio, secondo l’elemento chimico qualificante), ci si aspetta che il migliore risultato sia quello ottenuto applicando il modello della classe di effettiva appartenenza. Ne segue che il valore *minimo* della differenza tra valore colorimetro e dato fotografico corretto secondo le varie classi permette di identificare la classe di appartenenza del campione. Così, se sui dati fotografici ottenuti da un campione “malachite” $[\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2]$ vengono applicate sia una *caratterizzazione* secondo la classe del ferro sia una *caratterizzazione* secondo la classe del rame, si otterranno due risultati molto diversi. Come visualizzato in Figura 10.7, la correzione secondo la classe del ferro sarà molto distante dal valore del colorimetro, mentre quella ottenuta applicando il modello del rame sarà molto prossima.

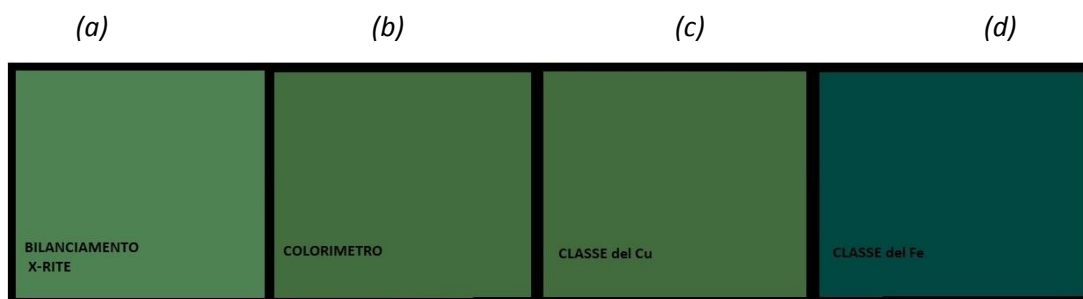


Figura 10.7. Confronto tra le visualizzazioni ottiche del campione malachite in base (a) alle misure digitali “bilanciate” fotograficamente, (b) alle misure colorimetriche, (c) alle misure digitali caratterizzate secondo la classe del rame, (d) alle misure digitali caratterizzate secondo la classe del ferro

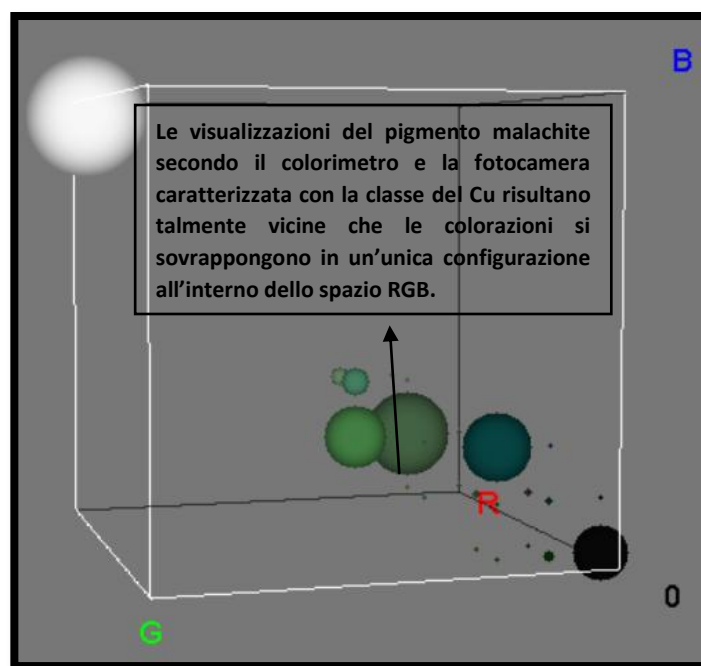


Figura 10.8. Visualizzazione nello spazio RGB del campione malachite descritto sia dalle misure colorimetriche che dalle misure digitali caratterizzate sia secondo la classe del rame che del ferro.

Anche la Figura 10.8 evidenzia chiaramente, attraverso una visualizzazione tridimensionale nello spazio RGB, quanto ottenuto. Il colore corretto secondo la classe del rame è molto più vicina al valore del colorimetro, se confrontata con il colore ottenuto applicando il modello della classe del ferro.

I riscontri di questi ultimi studi suggeriscono che l'applicazione della *caratterizzazione* per singola classe non solo permette di utilizzare i dati digitali per monitorare gli interventi di ripristino di un'opera d'arte con una validità che si avvicina a quella delle misure colorimetriche, ma di poter identificare l'elemento chimico costituente un campione in esame o confermare studi di diagnostica svolti per il riconoscimento dei pigmenti. Infatti, il valore *minimo* della differenza tra valore colorimetro e dato fotografico corretto secondo le varie classi permette di identificare la classe di appartenenza del campione.

Capitolo 11

Caratterizzazione per “classi” sulla base dell’elemento chimico predominante (“classi” elementali): casi di studio

In seguito agli interessanti risultati ottenuti *caratterizzando* le foto sulle campiture secondo “classi” elementali, si è deciso di verificare quanto questo approccio potesse essere valido per classificare campiture di attribuzione ignota o incerta, identificando l’elemento chimico caratterizzante. Sono, pertanto, stati affrontati diversi casi studio e a seguire ne illustrerò in particolare due: il primo (*formella policroma su lamina di ferro*) evidenzia la potenzialità nell’utilizzare la *caratterizzazione* per classe non solo come approccio in alternativa al colorimetro, ma anche come metodo per sostenere ed affiancare altri strumenti analitici atti ad identificare la composizione chimica del campione in esame; il secondo (*blu egiziano*), invece, conferma alcune delle specifiche della *caratterizzazione* stessa necessarie al fine di avvalersi di questo approccio in maniera più coerente e corretta.

11.1. *Ex-voto: formella policroma su lamina di ferro.*



Figura 11.1. Ex-voto con l’indicazione dei punti analizzati dalla dottoressa Annalisa Demelas in un progetto di diagnostica precedente al mio dottorato: gli asterischi indicano i campioni prelevati, i cancelletti i punti analizzati con l’XRF.

Nel marzo del 2013 la dottoressa Annalisa Demelas, nell'ambito di un progetto di ricerca finanziato con un assegno della Regione Liguria, svolto presso il Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale dell'Università degli Studi di Genova, ebbe, tra i diversi esempi di arte povera da analizzare, l'ex-voto su lamina di ferro di Figura 11.1, datato 1898, appartenente ad una collezione privata. Furono svolte analisi sia XRF (Fluorescenza a Raggi X) su 6 punti della pellicola pittorica, indicati nella figura sono con il segno #, sia di Microscopia Ottica (OM) e di Microscopia a Scansione Elettronica e Spettroscopia a Dispersione di Energia (SEM-EDS) su 3 prelievi, illustrati in Fig.11.1 con il segno *.

Approfittando di questa possibilità di confronto con una diagnostica che non aveva sempre fornito risultati univoci, si è deciso di applicare all'ex-voto una *caratterizzazione* in funzione della classe elementale su ognuno dei punti ("aree", in effetti, nel mio caso, visto l'utilizzo di strumenti non "puntuali") collocati approssimativamente nelle stesse posizioni indagate dalla dottoressa Demelas.

Le 9 aree corrispondenti ai punti analizzati dalla dottoressa Demelas sono state da me misurate sia con il colorimetro Konica Minolta CM-2600d che con la fotocamera Panasonic, scattando 9 foto per ogni area indagata; le impostazioni dei due strumenti così come la prassi adottata per estrarre i valori sul colore dalle foto sono le medesime definite e consolidate in questo progetto di dottorato, descritte nei capitoli precedenti. I dati fotografici sul colore sono stati *caratterizzati* con il metodo originale messo a punto durante il dottorato e con il metodo di letteratura MLR (**p5**), secondo le classi del ferro, del rame e del piombo.

Si ricorda, dai capitoli precedenti, che la valutazione sulla capacità ed efficacia della *caratterizzazione* per classe elementale consiste nel valutare la differenza colorimetrica ΔE_{00} tra i dati colorimetrici e i corrispettivi fotografici *caratterizzati*: se questi differiscono di un valore, stabilito sulla base di test e di riscontri in letteratura, nell'intervallo $3 \div 3,5$ allora, molto probabilmente, appartengono alla classe per la quale è definita la *caratterizzazione* e, quindi, contengono, nella loro composizione chimica, "quello" specifico elemento.

La *caratterizzazione* secondo la classe del ferro (Fe) ha fornito i risultati di Tabella 11.1, dai quali si evince come le campiture 4 e 6 risultino pigmenti contenenti il ferro, come anche, con tutta probabilità, il pigmento della campitura 1.

Area in esame (cf. Figura 11.1)	ΔE_{00}
1	3,73
2	7,29
3	13,16
4	1,05
5	16,20
6	0,35
7	17,40
8	5,94
9	8,04

Tabella 11.1. Differenze colorimetriche tra i dati colorimetrici e i rispettivi fotografici *caratterizzati* secondo la classe del ferro.

La *caratterizzazione* secondo la classe del piombo (Pb) ha, invece, dato i risultati di Tabella 11.2, che inducono a pensare che i pigmenti stesi nell'aree 1, 2, 5 e 8 siano caratterizzati dalla presenza di questo elemento chimico.

Area in esame (cf. Figura 11.1)	ΔE_{00}
1	3,59
2	3,58
3	7,25
4	8,41
5	3,13
6	4,91
7	16,60
8	2,31
9	6,34

Tabella 11.2. Differenze colorimetriche tra i dati colorimetrici e i rispettivi fotografici caratterizzati secondo la classe del piombo.

Infine, la *caratterizzazione* secondo la classe del rame (Cu) ha fornito i risultati di Tabella 11.3. I valori delle differenze colorimetriche ottenuti secondo quest'ultima *caratterizzazione* sono molto alti, superando di gran lunga la soglia di 3,5 unità colorimetriche: questo induce a pensare che per realizzare questo ex-voto non siano stati utilizzati pigmenti a base di rame.

Area in esame (cf. Figura 11.1)	ΔE_{00}
1	35,30
2	32,95
3	20,70
4	9,82
5	41,30
6	29,56
7	47,65
8	35,08
9	41,95

Tabella 11.3. Differenze colorimetriche tra i dati colorimetrici e i rispettivi fotografici caratterizzati secondo la classe del rame.

Il confronto tra questo lavoro e lo studio svolto dalla dottoressa Demelas, riportato in Tabella 11.4, ha dato dei riscontri positivi in quanto, ad esempio, nei punti di misura 1, 2, 5 e 8 era stata effettivamente individuata la presenza di piombo, così come la presenza del ferro nei punti 1, 4 e 6; Non era, in effetti, mai stata riscontrata la presenza del rame.

Più in dettaglio, la dottoressa Demelas, sui tre prelievi analizzati tramite OM e SEM-EDS, conclude che:

- *il prelievo 1*, cioè il **rosso**, è composto da un impasto a base di ferro e piombo, in perfetto accordo con i risultati della *caratterizzazione* da me applicata;

- *il prelievo 2*, ossia il **verde**, è composto da un impasto anch'esso a base di ferro e piombo; la *caratterizzazione* ha individuato solo il piombo, ma, d'altra parte, l'analisi al SEM aveva rilevato una percentuale di piombo più elevata rispetto a quella del ferro; inoltre la presenza di ferro può essere dovuta al supporto (ferro o latta): devo ricordare, a questo proposito, che l'analisi colorimetrica, così come quella fotografica, è un'analisi superficiale, non in grado di rilevare cromie o metalli negli strati più profondi di una stratigrafia pittorica;
- *il prelievo 3*, il **blu**, risulta, all'analisi, essere composto da piombo (identificando il pigmento come biacca, ossia carbonato basico di piombo) e da alluminio; la presenza di quest'ultimo elemento viene giustificata dall'assegnista associandolo al blu di Prussia oppure come elemento utilizzato nella produzione di un colore organico. Secondo la *caratterizzazione* questa cromia non contiene né ferro né piombo. La Demelas descrive che l'ex-voto ha una imprimitura a base di biacca, per cui non è da escludere che la presenza della biacca nel prelievo 3 (rilevata dalle precedenti analisi) sia dovuta ad una mescolanza della campitura blu con l'imprimitura stessa.

Le aree analizzate con XRF mostrano sempre la presenza di Ca, Fe e Pb, tranne che nel punto di misura 5, in cui sono stati individuati solo gli elementi Fe e Pb. Considerando che lo strumento XRF non svolge un'analisi solo superficiale ma va in profondità, la presenza costante del ferro è legata indubbiamente alla natura del supporto dell'opera d'arte, ossia ferro non stagnato, mentre la presenza quasi costante di piombo è legata, a sua volta, ad un'imprimitura del supporto a base di biacca. L'individuazione del calcio in tracce viene attribuito dalla dottoressa Demelas al fatto che molto spesso nelle terre a base di ferro è facile riscontrare questo elemento in tracce.

Di seguito (cf. anche Tabella 11.4) si riporta l'interpretazione fornita dalla Dott.ssa Demelas, [D], e, per confronto, quanto risulta dalla mia *caratterizzazione* [M].

- *Punto di misura 4 (blu)*
 [D]: sembra essere biacca mescolata con blu di Prussia ma non si esclude la presenza di un colorante di natura organica, perchè non si riscontrano altri elementi in supporto dell'ipotesi del blu di Prussia;
 [M]: il colore in esame è a base di ferro quindi si può affermare che si tratti, con tutta probabilità, di blu di Prussia.
- *Punto di misura 5 (bianco):*
 [D]: sicuramente biacca;
 [M]: dall'interpretazione che si basa sui risultati della *caratterizzazione* si può trarre la medesima conclusione.
- *Punto di misura 6 (rosso)*
 [D]: si suppone che sia minio, a causa della presenza di piombo, o terra rossa perché l'XRF ha individuato anche del ferro;
 [M]: la *caratterizzazione* definisce questo colore come appartenente alla classe del ferro quindi ciò induce a supporre che si tratti di una terra rossa.
- *Punto di misura 7 (rosa/rosso)*
 [D]: il colore della manica della veste della Madonna potrebbe essere minio o terra rossa;
 [M]: in base alla *caratterizzazione* non sono stati individuati né ferro né piombo, cosa che sembra escludere entrambe le ipotesi precedenti.

- *Punto di misura 8 (verde)*







[D]: l'ipotesi più semplice sul verde della parete è che si tratti di terra verde, ma i mancati rilevamenti di nichel e cromo inducono ad ipotizzare che sia un colore organico;

[M]: i risultati sulla *caratterizzazione* suggeriscono la presenza di un pigmento a base di piombo; non è chiaro, comunque, se la campitura verde sia stata ottenuta mescolando un pigmento blu con quello uno giallo.

- *Punto di misura 9*

[D]: il colore del pavimento viene attribuito ad una qualche terra a base di ferro o ad un pigmento giallo come il litargirio o il massicot, cioè pigmenti composti da ossidi di ferro;

[M]: i risultati della *caratterizzazione* non supportano l'appartenenza di questo colore né alla classe del ferro né a quella del piombo.

Punto di misura	Elementi riscontrati da Demelas	Commento Dott.ssa Demelas	Elementi riscontrati tramite <i>caratterizzazione</i> per classi elementali	Commenti sulla base dei risultati della <i>caratterizzazione</i>
1 	Fe, Pb	Impasto a base di ferro e piombo	Fe, Pb	Colorazione a base di ferro e piombo
2 	Fe, Pb	Impasto a base di ferro e piombo	Pb	Colorazione a base di piombo
3 	Al, Pb	Blu di Prussia o colore di natura organica	Nessun elemento individuato	Colorazione di natura organica, o inorganica appartenente ad una classe non caratterizzata
4 	Ca, Pb, Fe	Colore ottenuto mescolando biacca con blu di Prussia o blu di natura organica	Fe	Blu di Prussia
5 	Fe, Pb	Biacca	Pb	Biacca
6 	Ca, Pb, Fe	Minio o terra rossa	Fe	Terra rossa

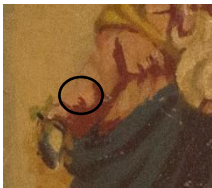


7 	Ca, Pb, Fe	Minio o terra rossa	Nessun elemento individuato	Colorazione di natura organica, o inorganica appartenente ad una classe non caratterizzata
8 	Ca, Pb, Fe	Terra verde ma l'assenza di nichel e cromo potrebbe indicare la natura organica della colorazione	Pb	Colorazione ottenuta mescolando del blu con un pigmento giallo a base di piombo
9 	Ca, Pb, Fe	Terre o ossidi di piombo di colorazione gialla	Nessun elemento individuato	Colorazione di natura organica, o inorganica appartenente ad una classe non caratterizzata

Tabella 11.4. Ex-voto su lamina di ferro: confronto tra i dati riscontrati dalla dottoressa Demelas e quanto dedotto con la caratterizzazione.

Come si osserva dal confronto tra le conclusioni sul lavoro di diagnostica svolte nel marzo 2013 e quelle dedotte in seguito all'applicazione della *caratterizzazione* per classi elementali alle misure fotografiche, vi sono alcuni aspetti in accordo ed altri discordanti. Tuttavia, sia nello studio precedente che nell'applicazione della *caratterizzazione*, alcune aree misurate e analizzate, sebbene presentino otticamente una colorazione simile, sembrano costituite da diverse composizioni chimiche: questo induce a pensare alla possibilità di eventuali ritocchi sulla pellicola pittorica successivi alla realizzazione dell'opera stessa. A questo proposito sarebbe interessante poter svolgere, in futuro, altre analisi, quale ad esempio quella del "falso colore", per comprendere se effettivamente vi siano dei ritocchi.

La *caratterizzazione*, nonostante richieda ancora ulteriori studi ed approfondimenti, appare essere tuttavia un valido strumento in aggiunta alle indagini diagnostiche, specie quando queste ultime prevedano l'utilizzo di strumenti che forniscono informazioni sul bene artistico nel suo complesso, senza distinguere la natura compositiva di ciascun strato con cui è realizzato l'oggetto stesso. La *caratterizzazione* è un'analisi superficiale, per cui può contribuire a fornire dati sulla composizione dell'interfaccia visibile dell'oggetto artistico; ovviamente, se si vogliono informazioni di natura chimico/fisica a livello di strato preparatorio e/o di supporto, si rende necessario l'utilizzo di strumenti diversi.

Come ulteriore considerazione, va detto che nel progetto di dottorato i coefficienti per la *caratterizzazione* sono stati calcolati su un *dataset* composto prevalentemente da campiture ad olio su tela (DCCI) o tavola (La Venaria Reale), cioè un set di dati realizzati su supporti diversi da quello dell'ex-voto in esame; questo ovviamente può rendere la *caratterizzazione* meno precisa, senza considerare che sull'immagine decorativa dell'ex-voto sono stati stesi uno o più strati protettivi a differenza del *dataset* da me utilizzato. Sarebbe interessante valutare come si comporterebbe la *caratterizzazione* per classe nel caso in cui i coefficienti fossero calcolati su pellicole pittoriche ad

olio stese su supporti metallici ed aventi uno strato protettivo. Risultati più precisi sono molto più probabili lavorando su campioni simili anche nella tecnica pittorica e/o nel supporto.

11.2. *Blu egiziano.*

Sono stati analizzati dei campioni di blu egiziano stesi con gomma arabica su dei vetrini senza alcuna imprimitura su questi. I campioni in questione (Figura 11.2) sono stati preparati dalla tesista Chiara Fucina per la sua tesi di laurea magistrale in Metodologie per la Conservazione e il Restauro dei Beni Culturali dell'Università di Genova e riguardante lo studio dei cambiamenti del pigmento nel corso del tempo. Il pigmento (silicato di rame e calcio: $\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$, ovvero $\text{CaO}\cdot\text{CuO}\cdot 4\text{SiO}_2$) è un prodotto della ditta Kremer che, come sopra scritto, è stato steso su un vetrino mescolandolo con gomma arabica. I diversi campioni, così preparati, sono stati lasciati ad asciugare per un giorno a temperatura ambiente e, successivamente, invecchiati ponendoli all'interno di una stufa a 70 °C per 15 giorni con una soluzione di sale (NaCl) per mantenere l'umidità dell'ambiente al 75%.

Sono state effettuate misure sia fotografiche che colorimetriche su tre campioni, avendo a disposizione solo due campioni di blu egiziano non ancora invecchiato ed uno dopo invecchiamento. Sui tre campioni sono stati applicati il metodo originale e quello di letteratura per la *caratterizzazione* sia secondo la classe del rame che secondo la classe del blu. I risultati evidenziano che i metodi non funzionano su questi campioni, come è visibile dalla tabella sottostante (Tabella 11.5).



Figura 11.2. Campioni di blu egizio stesi con gomma arabica: a sinistra il campione con il pigmento appena asciutto, a destra il campione invecchiato.

E' evidente che nessuno dei due metodi correttivi utilizzati ha fornito valori di ΔE_{00} soddisfacenti, risultato perfettamente comprensibile e peraltro atteso considerando che il *training set* usato per la *caratterizzazione* e le campiture di blu egizio analizzate rappresentano due contesti completamente diversi: pigmenti stesi come dispersione in olio su supporti non trasparenti (tela o tavola) nel primo caso (*training set*) e pigmenti stesi come dispersione in gomma arabica su vetrino nel secondo caso (*test set*).

	Classe del Rame ΔE_{00} medio	Classe del Blu ΔE_{00} medio
Metodo di letteratura	21,41 \pm 5,69	8,42 \pm 3,58
Metodo originale	19,62 \pm 3,60	14,82 \pm 4,80

Tabella 11.5. Blu egizio: differenza colorimetrica media tra i dati colorimetrici e i corrispettivi digitali corretti con i diversi metodi per la caratterizzazione secondo la classe del Rame o quella del Blu.

Secondo logica, infatti, è consigliabile *caratterizzare* dei dati se questi si riferiscono a campioni con caratteristiche fisiche, quali la superficie o il materiale con il quale sono realizzati o le tecniche artistiche utilizzate, simili a quelle dei campioni che compongono il *training set*, perché ovviamente la *caratterizzazione* si basa su relazioni tra dati che sono correlate, a loro volta, anche ad aspetti di natura fisica.

11.3. Classificazione di cromie mediante approcci statistici.

Fermo restando l'obiettivo primario del lavoro di tesi, cioè la messa a punto di un modello di *caratterizzazione* di una fotocamera sufficientemente efficace, robusto e competitivo con modelli già presenti in letteratura, una volta acquisite anche le misure sulle tavole messe a disposizione dal centro La Venaria Reale, si è deciso anche di verificare quanto effettivamente, utilizzando soltanto dei dati colorimetrici sui pigmenti, si potessero trarre informazioni riguardanti la loro composizione chimica. E' stata pertanto svolta una classificazione su un *dataset* rappresentato dalle misure colorimetriche acquisite sia sulle campiture su tela (nel mese di gennaio 2019) che sulle campiture sulle due tavole di Venaria Reale (nel mese di dicembre del 2018), attraverso i principali metodi di classificazione, quali LDA, Bayesiano Naive e stima di densità di Kernel. I metodi considerati sono tutti approcci statistici che si basano sulla stima di distribuzione di probabilità dei dati considerati.

Nello specifico:

-- il *classificatore Bayes Naive* si basa sul teorema di probabilità di Bayer di eq. 11.1:

$$p(c | \mathbf{x}) = \frac{p(c) \cdot f(\mathbf{x} | c)}{\sum_c p(c) \cdot f(\mathbf{x} | c)} \quad (11.1)$$

dove $p(c)$ è la probabilità a priori della classe c , $f(\mathbf{x} | c)$ è la probabilità a posteriori di \mathbf{x} (ad esempio la probabilità che, sotto la condizione d'appartenere alla classe c , X abbia il valore " \mathbf{x} "), $p(c | \mathbf{x})$ è la probabilità a posteriori della classe c , quindi la probabilità che, quando X ha il valore \mathbf{x} , l'oggetto appartenga alla classe c ;

-- *LDA* è un metodo statistico parametrico ossia la distribuzione di probabilità è descritta da parametri di dispersione e locazione (come media, varianza e covarianza), infatti questa tecnica multivariata (introdotta da R.A. Fisher nel 1936) prevede il calcolo sia della media che delle matrici di covarianze per ogni categoria/classe studiata⁷⁷;

⁷⁷ Scuola di Chemiometria, Analisi Multivariata, 21-25 Gennaio 2018, Genova.

-- la *stima di densità di Kernel* è un approccio statistico non parametrico che risulta essere più semplice e robusto⁷⁸.

Considerando che il *dataset* (in totale, 148 campioni; due campioni delle tavole di La Venaria Reale sono stati esclusi in quanto non è stato possibile accertarne la composizione chimica) presentava un buon numero di pigmenti a base di ferro (35 campiture), la classificazione è stata svolta per verificarne la capacità di individuare/differenziare proprio queste campiture rispetto a campiture non contenenti questo elemento (individuate, nelle tabelle a seguire, come “senza Fe”). Le matrici di confusione per i tre metodi di classificazione (Tabella 11.6) mostrano una buona capacità predittiva nel classificare correttamente i pigmenti del ferro: in particolare il classificatore Bayesiano e la stima di densità di Kernel. Così, a titolo di esempio, l’approccio “Kernel” ha individuato correttamente 31 campiture su 35 come contenenti Fe e 107 campiture su 113 come non contenenti Fe.

Confrontando anche l’errore in cross-validation (Tabella 11.7) l’approccio “Kernel” risulta essere comunque un classificatore competitivo.

	LDA		Bayes-Naive		Stima di densità di Kernel	
	Senza Fe	Fe	Senza Fe	Fe	Senza Fe	Fe
Senza Fe (totale: 113)	102	11	106	7	102	11
Fe (totale: 35)	24	11	7	28	4	31

Tabella 11.6. Matrice di confusione sul dataset per ogni metodo di classificazione.

	Errore in Cross-Validation
LDA	0,24
Bayes Naive	0,11
Stima di densità di Kernel	0,16

Tabella 11.7. Errore in Cross-Validation di ogni metodo di classificazione.

Volendo comprendere meglio l’efficacia della *classificazione*, il *dataset* (148 campiture) è stato diviso in *training set* e *test set*: il *training set* è composto da misure su 119 campioni, di cui 32 campiture a base di ferro, mentre il *test set* è composto dalle restanti 29 misure di cui 3 relative a campioni aventi il ferro come componente elementale. Le matrici di confusione sul *training set* e i relativi errori dei tre metodi sono riportati nelle Tabella 11.8 e 11.9, rispettivamente, mentre i risultati su *test set* e relativi errori sono riportati nelle Tabelle 11.10 e 11.11, rispettivamente. Come si può notare, nel *training set* il classificatore complessivamente migliore risulta essere quello di Bayes Naive; la stima di densità di Kernel ha classificato più correttamente le campiture a base di ferro, ma ha mostrato una performance meno soddisfacente nel predire i campioni “senza ferro” (vedi Tabella 11.8). Nel *test set* i tre metodi a confronto hanno classificato erroneamente 5 misure; in particolare il metodo LDA ha mal classificato proprio i campioni appartenenti alla classe del ferro.

⁷⁸ N.Fanizzi, Corso d’Apprendimento Automatico, Dipartimento di Informatica, Università degli Studi di Bari, 2009.

	LDA		Bayes-Naive		Stima di densità di Kernel	
	Senza Fe	Fe	Senza Fe	Fe	Senza Fe	Fe
Senza Fe (totale: 87)	75	12	81	6	77	10
Fe (totale: 32)	15	17	6	26	3	29

Tabella 11.8. Matrice di confusione sul training set per ogni metodo di classificazione.

	Errore in Cross-Validation nel training set
LDA	0,23
Bayer Naive	0,13 (0,127)
Stima di densità di Kernel	0,13 (0,134)

Tabella 11.9. Errore nel training set di ogni metodo nel classificare i campioni che contengono ferro.

	LDA		Bayes-Naive		Stima di densità di Kernel	
	Senza Fe	Fe	Senza Fe	Fe	Senza Fe	Fe
Senza Fe (totale: 26)	22	4	21	5	21	5
Fe (totale: 3)	1	2	0	3	0	3

Tabella 11.10. Matrice di confusione sul test set per ogni metodo di classificazione.

	Errore nel test set
LDA	0,17
Bayer Naive	0,17
Stima di densità di Kernel	0,17

Tabella 11.11. Errore nel test set di ogni metodo nel classificare i campioni che contengono ferro.

Tassello	Composizione	LDA	Bayes Naive	Kernel
51	Pb(Sb,Sn)O ₃	Senza-Fe	Senza-Fe	Senza-Fe
58	Silicato a base di Ferro	Senza-Fe	Fe	Fe
23	Fe ₂ O ₃ + MnO ₂ + Si + Al ₂ O ₃	Fe	Fe	Fe
30	Di natura organica	Fe	Fe	Fe
33	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Senza-Fe	Fe	Fe
40	Di natura organica	Fe	Fe	Fe
41	Cu(CH ₃ COO) ₂	Senza-Fe	Senza-Fe	Senza-Fe
A	Di natura organica	Senza-Fe	Senza-Fe	Senza-Fe
76	A base di rame	Senza-Fe	Senza-Fe	Senza-Fe
77	Derivante dallo zirconio	Senza-Fe	Senza-Fe	Senza-Fe
94	C ₂₃ H ₈ Cl ₈ N ₄ O ₂	Senza-Fe	Senza-Fe	Senza-Fe
95	C ₈ H ₇ NO	Senza-Fe	Senza-Fe	Senza-Fe
99	Allumino silicato di sodio con presenza di ossidi di metalli diversi dal ferro	Senza-Fe	Senza-Fe	Fe
100	"	Senza-Fe	Senza-Fe	Senza-Fe
101	"	Senza-Fe	Senza-Fe	Senza-Fe
105	Silicato a base di sodio,	Senza-Fe	Senza-Fe	Senza-Fe

	alluminio e zolfo			
112	Di natura organica	<i>Senza-Fe</i>	<i>Senza-Fe</i>	<i>Senza-Fe</i>
113	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	<i>Fe</i>	<i>Fe</i>	<i>Fe</i>
115	granito	<i>Senza-Fe</i>	<i>Senza-Fe</i>	<i>Senza-Fe</i>
116	$\text{Cu}(\text{C}_{32}\text{N}_8\text{Cl}_{14}) + 16\text{HCl}$	<i>Senza-Fe</i>	<i>Senza-Fe</i>	<i>Senza-Fe</i>
123	A base di cadmio	<i>Senza-Fe</i>	<i>Senza-Fe</i>	<i>Senza-Fe</i>
124	A base di cadmio	<i>Senza-Fe</i>	<i>Senza-Fe</i>	<i>Senza-Fe</i>
125	Di natura organica	<i>Senza-Fe</i>	<i>Senza-Fe</i>	<i>Senza-Fe</i>
127	$\text{C}_{32}\text{H}_{16}\text{CuN}_8$	<i>Senza-Fe</i>	<i>Senza-Fe</i>	<i>Senza-Fe</i>
128	A base di rame	<i>Senza-Fe</i>	<i>Senza-Fe</i>	<i>Senza-Fe</i>
130	$\text{C}_{32}\text{H}_{16}\text{CuN}_8$	<i>Senza-Fe</i>	<i>Senza-Fe</i>	<i>Senza-Fe</i>
132	Di natura organica	<i>Fe</i>	<i>Fe</i>	<i>Senza-Fe</i>
135	Di natura organica	<i>Fe</i>	<i>Fe</i>	<i>Fe</i>
136	A base di cadmio	<i>Senza-Fe</i>	<i>Senza-Fe</i>	<i>Senza_Fe</i>

Tabella 11.12. *Classificazione del test set: sono riportati, per ogni tassello come viene predetta la loro classificazione secondo i metodi utilizzati.*

Questo studio, del tutto preliminare, è stato svolto per completare le indagini effettuate sul dataset a disposizione; ovviamente ulteriori approfondimenti sarebbero necessari con un maggiore numero di dati di composizione chimica certa. Questo studio, tuttavia, suggerisce che questo tipo di trattamento dei dati potrebbe rivelarsi valido quanto l'obiettivo principale del dottorato, cioè la *caratterizzazione* di una macchina fotografica.

Conclusioni

Il lavoro svolto in questi tre anni di dottorato evidenzia quanto l'elaborazione di immagini digitali storico artistiche possa effettivamente dare un valido contributo alla diagnostica di un oggetto artistico e, al tempo stesso, essere ausilio al restauratore prima, durante e dopo l'esecuzione di un progetto di conservazione o restauro.

Lo studio preliminare svolto sulle formelle dei Misteri del Rosario di Chiusanico è la prova di come, da un semplice studio sul colore nel digitale, si possano estrarre informazioni utili per monitorare un intervento di restauro e verificarne la validità e l'efficacia tramite la comparazione di parametri colorimetrici prima e dopo l'intervento. Un limite a questo tipo di indagine è legato alle modalità con le quali vengono acquisite le foto, che devono essere standardizzate per garantire una corretta comparazione.

Partendo da questi risultati, la richiesta, decisamente più impegnativa dal punto di vista realizzativo, del restauratore o comunque dell'esperto d'arte di essere messo in grado di usare in maniera "semplice" e facilmente accessibile la fotocamera digitale al pari di un colorimetro, per monitorare su basi quantitative/oggettive, un intervento di ripristino o semplicemente per lo studio di un oggetto artistico, è stata soddisfatta individuando la risposta nella *caratterizzazione* della fotocamera. A tal fine, metodi di elaborazione riportati in letteratura sono stati inizialmente testati su un set di dati appositamente predisposto per questo progetto; in un secondo tempo, è stato elaborato un metodo originale che si avvale di un trattamento relativamente più semplice dei dati, i cui risultati sono del tutto confrontabili con quelli dei metodi di letteratura.

Nel corso dell'ultimo anno di dottorato, un significativo miglioramento al metodo originale è stato infine raggiunto mediante l'applicazione di una *caratterizzazione* per classe elementale, che ha dato risultati più affidabili e robusti rispetto ad una seconda possibile *caratterizzazione* per classe, cioè quella per classe cromatica. In definitiva, il risultato principale che emerge da questi studi è che l'analisi digitale della cromia di una superficie dipinta consente l'identificazione del pigmento con buona/ottima affidabilità se elaborata facendo riferimento alla costituzione chimica piuttosto che della cromia stessa. Questa constatazione apre un campo di indagine particolarmente interessante, teso ad individuare i motivi per i quali la struttura atomica possa correlarsi ad una così affidabile attribuzione cromatica: sarebbero necessari, immagino, studi come la diffrattometria a raggi X (XRD), analisi termiche o simili per comprendere la struttura cristallina dei campioni in esame, conoscere la disposizione degli atomi nello spazio così come le loro interazioni con la luce al fine di comprendere quanto questi fattori influenzino effettivamente la *caratterizzazione* per classe elementale.

La classe del ferro, per il momento, risulta essere la più valida fra tutte le classi studiate, ma è pur vero che è anche la classe avente il *dataset* più numeroso; sarebbe quindi interessante valutare e verificare, come sviluppo del presente progetto, in che grado risultati parimenti o ancora più gratificanti, in precisione e robustezza, si potrebbero ottenere se ogni "classe" potesse essere caratterizzata mediante un *dataset* costituito da un numero elevato di campioni. In teoria il modello di regressione definito per ogni classe dovrebbe basarsi su un *training set* composto dalla giusta quantità di dati idonei, cioè descrittivi la natura della classe stessa: in effetti, come limite del

presente progetto, non ho avuto sempre la possibilità di avere un numero di dati sufficienti per ogni classe, quindi non banale sarebbe valutare come una quantità di dati più appropriata possa incidere incida sulla validità dei vari modelli.

Le premesse per una ottimizzazione del metodo ci sono tutte, anche se, ovviamente, sarebbero necessari ulteriori casi studio per confermare gli esiti positivi da me riscontrati, dando più consistenza ai gratificanti risultati sinora ottenuti e quindi più garanzia al successo di ulteriori approfondimenti.

Il metodo caratterizzante scelto e studiato in questo progetto può risultare forse ancora troppo elaborato, perché richiede numerosi dati per definire poi il modello matematico necessario per la *caratterizzazione*, ma è anche vero che ogni restauratore ha, nel proprio laboratorio, una quantità elevata di campioni, pigmenti di ogni epoca, tele, tavole, solventi, resine: ossia tutto il necessario per creare un proprio *dataset* e raggiungere in maniera autonoma una buona *caratterizzazione*. Naturalmente i programmi scritti dovrebbero essere resi usufruibili gratuitamente onde ridurre eventuali costi, dato che obiettivo principale del progetto sarebbe fornire uno strumento valido quanto il colorimetro, ma più economico di questo.

Le conclusioni tratte dalla *caratterizzazione* per classe elementale, ossia la possibilità di utilizzare la *caratterizzazione* per individuare l'elemento chimico principale nella composizione del campione in esame, suggeriscono la possibilità, ove si sia forniti di colorimetro e macchina fotografica, di usufruire di questo metodo a sostegno di altri strumenti per l'identificazione chimica dei campioni studiati [ad esempio una strumentazione di fluorescenza ai raggi X (XRF)]. Gli esiti positivi del caso studio sull'ex-voto su lamina di ferro, già analizzato nell'ambito di un precedente progetto dalla dottoressa Demelas, indicano l'effettiva possibilità di usare la *caratterizzazione* per classe elementale come classificatore e identificatore di elementi chimici nell'oggetto analizzato. Certamente questo rappresenta solo un primo riscontro positivo del metodo messo a punto nel corso del mio dottorato. Ulteriori e più probanti conferme sono necessarie per una definitiva validazione, che potrebbe ovviamente comportare nuove modifiche per una ulteriore ottimizzazione e generalizzazione.

APPENDICE A

Valutazione della necessità della *caratterizzazione* di una fotocamera

La problematica è stata affrontata confrontando la differenza colorimetrica tra dati colorimetrici e fotografici corretti sia con il *plug-in* della ditta X-Rite (semplice *bilanciamento*) che con un modello polinomiale di *caratterizzazione* tratto dalla letteratura. Entrambi i metodi sono stati applicati sui 24 tasselli della scala colore (Tabella C.1) verificandone l'efficacia su *test set* rappresentato dalla misura delle 30 campiture sulla tela di Genova acquisite nel mese di febbraio 2018 (Tabella C.2).

<i>Applicazione sui tasselli della scala colore</i>	$\Delta E_{00(\text{medio})}$
Bilanciamento X-Rite	$8,79 \pm 3,30$
Modello polinomiale (p11) ^a	$1,99 \pm 0,06$

^aLa misura dei 24 tasselli è il *training set* del modello polinomiale.

Tabella C.1. Media delle differenze colorimetriche tra i dati colorimetrici e i corrispettivi fotografici corretti con il *plug-in* della ditta X-Rite o con il metodo polinomiale **p11** (dataset: 24 tasselli della scala colore).

<i>Test set</i>	$\Delta E_{00(\text{medio})}$
Bilanciamento X-Rite	$9,46 \pm 6,99$
Modello polinomiale	$9,31 \pm 3,16$

Tabella C.2. Media delle differenze colorimetriche tra i dati colorimetrici e i corrispettivi fotografici corretti con il *plug-in* della ditta X-Rite o con il metodo polinomiale **p11** (test set: 30 campiture della tela di Genova).

Come si può constatare, effettivamente il *plug-in* della ditta X-Rite migliora quantitativamente le foto, ma il risultato ($\Delta E_{00(\text{medio})} = 8,79 \pm 3,30$) è ancora troppo distante dall'obiettivo prefissato ($\Delta E_{00} \leq 3,00 \div 3,50$), anche considerando, come già detto, che la formula CIEDE2000 non è affidabile per valori maggiori di 5 unità colorimetriche. In effetti, il *plug-in* della ditta X-Rite è un software venduto per migliorare la resa qualitativa delle fotografie digitali, non tanto per calibrare le foto al punto da poter utilizzare i loro dati sul colore al pari di quelli colorimetrici.

D'altra parte, la correzione mediante il modello polinomiale è decisamente più efficace ($\Delta E_{00(\text{medio})} = 1,99 \pm 0,06$) sul *training set* (quindi più precisa) anche se solo leggermente più robusta.

Questo risultato non solo dimostra la necessità di una *caratterizzazione*, ma suggerisce un ampio margine di miglioramento in quest'area, che giustifica ulteriori approcci per la predisposizione di un modello di *caratterizzazione* più efficace.

APPENDICE B

Conversione dei dati colorimetrici e fotografici dallo spazio CIELab allo spazio RGB

-- **Conversione dallo spazio CIELab al sistema XYZ:**

$$Y_N = Y_{standard} \left[\frac{(L_N+16)}{116} \right]^3 \quad \text{se } Y_N > \left(\frac{6}{29} \right)^3$$

$$\text{altrimenti: } Y_N = Y_{standard} \times L_N \times \left(\frac{3}{29} \right)^3$$

$$X_N = X_{standard} \times \left(\frac{a_N}{500} + \left(\frac{Y_N}{Y_{standard}} \right)^{\frac{1}{3}} \right)^3 \quad \text{se } \frac{X_N}{X_{standard}} > \left(\frac{6}{29} \right)^3$$

$$\text{altrimenti: } X_N = \frac{108}{841} \times X_N \times \left(\frac{a_N}{500} + \left(\frac{Y_N}{Y_{standard}} \right)^{\frac{1}{3}} - \frac{16}{116} \right)$$

$$Z_N = Z_{standard} \times \left[\left(\frac{Y_N}{Y_{standard}} \right)^{\frac{1}{3}} - \frac{b_N}{200} \right]^3 \quad \text{se } \frac{Z_N}{Z_{standard}} > \left(\frac{6}{29} \right)^3$$

$$\text{altrimenti: } Z_N = \frac{108}{841} \times Z_N \times \left(\left(\frac{Y_N}{Y_{standard}} \right)^{\frac{1}{3}} - \frac{16}{116} - \frac{b_N}{200} \right)$$

dove $X_{standard}(0,9505)$, $Y_{standard}(1)$, e $Z_{standard}(1,0890)$ sono le coordinate del bianco di riferimento (D65).

-- **Conversione dal sistema XYZ allo spazio sRGB:** la conversione prevede un'operazione lineare ed una non lineare:

$$\text{matrice} = \begin{bmatrix} 3,2410 & -1,5374 & -0,4986 \\ -0,9692 & 1,8760 & 0,0416 \\ 0,0556 & -0,2040 & 1,0570 \end{bmatrix}$$

$$RGB_{lineare} = \text{matrice} \times XYZ$$

$$sRGB = 1,055 \times RGB_{lineare}^{\frac{1}{2,4}} - 0,055 \quad \text{se } RGB_{lineare} > 0,0031308$$

$$\text{Altrimenti } sRGB = 12,92 \times RGB_{lineare}$$

Glossario

Angolo di tinta – Grandezza psicometrica che sostituisce il concetto di lunghezza d'onda dominante definita nel sistema psicofisico.

Bilanciamento fotografico - Regolazione, puramente qualitativa, dei colori di una fotografia affinché risultino più verosimili o soddisfino i gusti del fotografo; normalmente utilizza software commerciali.

Brillanza – Attributo della sensazione visiva secondo cui un'area osservata appare inviare all'osservatore più o meno luce. Correlato fenomenico della luminanza. Per i colori di superficie, corrisponde all'intensità di luce che l'osservatore stima provenire da una data zona.

Calibrazione di una fotocamera – Impostazione dello strumento fotografico su valori specifici, per quanto riguarda sia i parametri di esposizione (quali distanza focale, ISO, diaframma, etc..) sia quelli estetici (come la saturazione, il contrasto, la luminosità).

Caratterizzazione di una fotocamera – Costruzione della descrizione del comportamento cromatico della fotocamera in condizioni di scatto e con regolazioni dello strumento esattamente definite. Obiettivo della *caratterizzazione* è quello di individuare la relazione esistente tra percezione del colore da parte della fotocamera rispetto al colorimetro, in modo da poter utilizzare la fotocamera stessa per una misura quantitativa del colore.

Chiarezza (o Luminosità, L^*) – Attributo della percezione del colore secondo cui si giudica la brillantezza di un'area in relazione alla brillantezza di un'area similmente illuminata che appare bianca. La chiarezza è definita come grandezza psicometrica nei sistemi CIELuv e CIELab.

Colorimetro - Strumento per la definizione di un colore attraverso la misurazione effettuata servendosi di filtri (in genere tre o quattro), in modo da fornire un risultato simile a quello dell'osservatore standard CIE secondo il modello XYZ. Non è in grado di eseguire la misura della composizione spettrale della luce che raggiunge il suo fotosensore (non ha, cioè, le stesse funzioni di uno spettrofotometro).

Chroma o Croma (C^*) – Attributo di un colore indicante la sua distanza dal colore grigio di uguale chiarezza. Di essa esistono definizioni psicometriche nei sistemi CIELuv (C^*_{uv}) e CIELab (C^*_{ab}), e la definizione data nel sistema dei colori di Munsell.

Differenza colorimetrica ΔE_{00} – Differenza tra due colori secondo la formula CIEDE2000.

Gamut - Il sottospazio, ovvero la gamma dei colori che possono essere rappresentati in uno specifico spazio colore o su una periferica (es. una stampante).

Filtro passa-banda - Dispositivo passivo che permette il passaggio di frequenze all'interno di un dato intervallo (la cosiddetta *banda passante*) ed attenua le frequenze al di fuori di esso.

Flusso luminoso – Flusso radiante pesato dalla sensibilità spettrale fotopica $V(\lambda)$.

Flusso radiante – Potenza emessa, trasferita o ricevuta sotto forma di radiazione.

Fotometria – Branca della fisica in cui le radiazioni sono specificate in base alle loro caratteristiche visive.

Indice di Pearson – Detto anche indice di correlazione: è un parametro che quantifica la bontà della correlazione tra due variabili (massima correlazione = 1,000).

Luminanza – $L(\lambda)$: flusso luminoso di una radiazione in una data direzione, all'interno dell'unità di angolo solido ed emessa da un'area apparente unitaria. In altre parole, la luminanza è il rapporto tra l'intensità luminosa emessa da una sorgente nella direzione dell'osservatore e l'area apparente della superficie emittente, così come vista dall'osservatore.

Lunghezza d'onda luminante – Grandezza psicofisica che si riferisce alla tinta del colore considerato.

Metamerismo - Con questo termine si indica la stessa percezione di colore di superfici aventi spettri di riflettanza diversi così come, viceversa, la percezione di un colore diverso, a seconda della sorgente con la quale il campione viene illuminato. Anche una macchina fotografica soffre di questo fenomeno, ossia un medesimo colore può risultare “diverso” a seconda della natura del campione o della fonte di illuminazione.

Modello del Tristimolo – Modello descrivente il colore considerando quest'ultimo come punto nello spazio colore descritto da tre componenti vettoriali, con riferimento ai tre differenti sensori (coni) dell'occhio umano.

Percezione del colore – Fenomeno complesso, definibile come una impressione di colore soggettiva, condizionata dalla situazione d'osservazione e frutto di una interpretazione mentale.

Plug-in - Programma non autonomo che interagisce con un altro programma per ampliarne o estenderne le funzionalità originarie.

Purezza – Grandezza psicofisica che si riferisce alla saturazione del colore considerato, cioè quanto il colore considerato differisce dal livello di grigio alla stessa luminosità.

Radiometria – Branca della fisica in cui le radiazioni elettromagnetiche sono specificate in base alle loro caratteristiche fisiche.

Riflettanza spettrale $\rho(\lambda)$ - Rapporto tra il flusso radiante riflesso totale e il flusso radiante incidente totale, alla lunghezza d'onda λ .

Saturazione – Pienezza di colore di un'area giudicata in relazione alla sua brillantezza.

Sensazione del colore – Esperienza soggettiva dovuta alla stimolazione dei fotorecettori dell'occhio da parte di una radiazione elettromagnetica visibile, essa prescinde da ogni condizionamento ed elaborazione mentale.

Sensibilità spettrale luminosa relativa $V(\lambda)$ (sensibilità spettrale fotopica) - Funzione di peso spettrale atta a ottenere le grandezze fotometriche dalle corrispondenti grandezze radiometriche spettrali.

Specificazione del colore – Insieme di tre numeri o notazioni atto a denotare un colore in un dato sistema dei colori.

Spettro del Visibile – Radiazioni elettro-magnetiche appartenenti alla regione compresa tra i 380 nm e i 780 nm circa. Lo spettro del visibile include i colori percepibili dall'occhio umano.

Stimolo del colore – Flusso radiante capace di produrre la sensazione di un colore.

Spettrofotometro - Strumento per la misurazione della frazione di intensità di radiazione visibile che una superficie riflette per diffusione alle diverse lunghezze d'onda. Dalla distribuzione spettrale della radiazione riflessa dipende il colore percepito. Una misura spettrofotometrica è di solito rappresentata dalla curva (*curva spettrale*) che descrive l'andamento del coefficiente di riflettanza (ossia, la percentuale di luce riflessa dal campione rispetto a quella incidente) in funzione della lunghezza d'onda della radiazione incidente. Essa può includere anche la zona dell'infrarosso in modo da ottenere una caratterizzazione più estesa delle proprietà di riflessione del materiale della superficie, al di là del solo spettro nel visibile. La spettrofotometria ~~non è una misura di colore~~, è una misura spettrale del colore, cioè nel dominio delle frequenze.

Test set - Nell'ambito della *caratterizzazione* del dato fotografico digitale mediante un metodo *supervisionato*, è quella parte del *dataset* utilizzata per valutare la robustezza del modello.

Training set (*calibration set*, o "set di formazione) – Nell'ambito della *caratterizzazione* del dato fotografico digitale mediante un metodo *supervisionato*, consiste in quella parte del *dataset* utilizzata per costruire il modello predittivo; il secondo, invece, denominato anche *evaluation set*.

Tinta o Hue (h o H) – Detta anche **tonalità**, è il colore "puro" percepito dall'apparato visivo umano. Convenzionalmente si misura con un angolo che, partendo dal rosso primario a 0°, passando per il verde primario a 120° e il blu primario a 240°, torna al rosso a 360°.

Acronimi e sigle

CCD (sensore) - Charge-Coupled Device.

CMC - Color Management Module (o Method).

CMOS (sensore) - Complementary Metal Oxide Semiconductor.

ICC - International Color Consortium.

PCS - Spazio di connessione tra profili.

Nel corso della trattazione sono state utilizzare le seguenti sigle, create ad hoc:

DXC1 (Dataset X-Rite Colorimetrico 1) - Dataset dei valori colorimetrici “esatti” del ColorChecker Passport Photo forniti dal produttore (Paragrafo 6.1).

DXC2 (Dataset X-Rite Colorimetrico 2)– Dataset dei valori colorimetrici valutati sperimentalmente con il colorimetro (Paragrafo 6.1).

DXF1 (Dataset X-Rite Fotografico 1)– Dataset dei valori fotografici ottenuti sul ColorChecker Passport Photo regolando lo strumento fotografico in modalità automatica (Paragrafo 6.1).

DGm/yC (Dataset tela di Genova month/year Colorimetrico) - Dataset delle misure colorimetriche del mese m (espresso con i numeri romani da I a XII) dell’anno y (18 o 19) (Paragrafo 6.2).

DGm/yF (Dataset tela di Genova month/year Fotografico) - Dataset delle misure fotografiche del mese m (espresso con i numeri romani da I a XII) dell’anno y (18 o 19) (Paragrafo 6.2).

DRC (Dataset tavole di La Venaria Reale Colorimetrico) - Dataset delle misure colorimetriche dei pigmenti depositati sulle Tavole di La Venaria Reale (Paragrafo 6.3).

DRF (Dataset tavole di La Venaria Reale Fotografico) - Dataset delle misure fotografiche dei pigmenti depositati sulle Tavole di La Venaria Reale (Paragrafo 6.3).

DRxxxm/y (Dataset tavole di La Venaria Reale, cromia xxx: gialla, rossa, blu, ecc...) - Dataset delle misure fotografiche dei pigmenti depositati sulle Tavole di La Venaria Reale, di cromia xxx (Paragrafo 10.1).

DGxxxm/y (Dataset tela di Genova, cromia xxx: gialla, rossa, blu, ecc...) - Dataset delle misure fotografiche dei pigmenti depositati sulla tela di Genova, di cromia xxx (Paragrafo 10.1).